

# ENTANGLEMENTUL CUANTIC

Roman Chirilă

roman.chirila@ici.ro

Institutul Național de Cercetare – Dezvoltare în Informatică, ICI București

**Rezumat:** Entanglementul cuantic este un fenomen cuantic care apare atunci când două sau mai multe particule cuantice sunt generate sau interacționează astfel încât starea cuantică a fiecărei particule nu mai poate fi descrisă independent de celelalte, chiar dacă acestea sunt separate spațial la distanțe foarte mari. Starea lor cuantică este descrisă mai degrabă ca un întreg. Lucrarea de față este un scurt rezumat a paradoxului EPR elaborat în 1935, inegalitățile lui Bell publicate în 1964 și experimentul lui Alain Aspect din 1982. De asemenea sunt discutate unele aspecte metafizice.

**Cuvinte cheie:** entanglement cuantic, paradoxul EPR, inegalitățile lui Bell, experimentul lui Aspect, variabile ascunse.

**Abstract:** The quantum entanglement is a quantum phenomenon occurring when pairs or groups of particles are generated or interact in ways such that the quantum state of each particle cannot be described independently of the others, even when the particles are separated by a very large distance. Their quantum state must be described for the system as a whole. The present paper is a short review of EPR paradox subjected of a 1935 paper, Bells inequality published in 1964, and Alain Aspects experiment in 1982. Some metaphysical aspects are also discussed.

**Keywords:** quantum entanglement, EPR paradox, Bell's inequality, Aspect's experiment, hidden variable.

## 1. Introducere

Una dintre caracteristicile absolut fascinante ale universului cuantic o reprezintă *nonlocalitatea*, cea despre care Einstein afirma că ar fi un fel de „acțiunea fantomatică la distanță” [1]. De altfel, lucrarea lui Einstein, Boris Podolsky și Nathan Rosen din 1935 a rămas cunoscută în literatura de specialitate sub denumirea de „paradoxul EPR”. Esența acestui paradox a fost excelent ilustrată prin teorema lui Bell din 1964 [2], precum și de lucrările experimentale cu totul remarcabile ale lui John Clauser și Stuart Freedman din 1972 [3], și ale lui Alain Aspect din 1982 [4].

Nonlocalitatea reprezintă, în esență, abilitatea obiectelor de a cunoaște instantaneu și reciproc starea lor cuantică, chiar și atunci când obiectele în cauză sunt separate spațial prin distanțe uriașe, de ordinul miliardelor de ani lumină. La prima vedere, această proprietate pare a fi în contradicție flagrantă cu „principiul acțiunii locale”, enunțat de Einstein, conform căruia obiectele îndepărtate nu pot influența starea unui obiect, ci doar cele aflate în vecinătatea acestuia. De asemenea, nonlocalitatea contravine principiului relativității restrânse al lui Einstein, conform căruia viteza maximă de transfer a oricărei informații din universul nostru material nu poate depăși viteza luminii în vid.

Prin urmare, nonlocalitate prezentată pe scurt până aici sugerează faptul că universul nostru este profund diferit de reprezentarea noastră obișnuită, newtoniană și instinctivă, în sensul că părți separate și distanțate ale universului nostru sunt de fapt conectate și întrepătrunse într-o manieră profund intimă. De fapt, însuși Einstein a fost împotriva acestor consecințe ale nonlocalității, declarând chiar că întreaga teorie cuantică este greșită și că astfel de idei (precum *nonlocalitatea*) el nu le va accepta niciodată, până la moarte.

În esență, *nonlocalitatea* apare datorită fenomenului de *entanglement*, prin care particule care interacționează între ele devin permanent corelate, sau depind de stările și proprietățile celorlalte particule aflate în interacție unele cu altele, până acolo încât ele își pierd individualitatea lor, comportându-se asemeni unei singure entități. De pildă, dacă doi electroni sunt produși împreună, când unul dintre ei va avea spinul *up*, atunci celălalt va avea spinul *down* (spinul total al sistemului va fi zero). Cu toate acestea, din perspectiva teoriei cuantice, o superpoziție a celor două stări este și aceasta posibilă, astfel încât cei doi electroni pot fi considerați simultan ca având spinul *up-down* și respectiv *down-up*. Dacă cei doi electroni sunt acum separați spațial, oricât de mult și fără a efectua vreo măsurătoare asupra lor, evitând producerea decoerenței lor, atunci observarea

ulterioară a celui de-al doilea electron va produce instantaneu un spin opus primului electron, astfel încât perechea de electroni va avea spinul total egal cu zero, indiferent cât de mare este separarea lor spațială.

Lucrările experimentale ale unor fizicieni de excepție [3], [4] au rămas în istoria fizicii, demonstrând categoric faptul că efectele de *nonlocalitate* sunt reale și că „acțiunea fantomatică la distanță” este cu adevărat cu putință.

## 2. Paradoxul EPR

O altă caracteristică fundamentală a teoriei cuantice este *nedeterminismul*, adică lipsa determinismului în sens clasic. Astfel, dacă avem o observabilă  $A$  și efectuăm o singură măsurătoare, rezultatul va fi una dintre valorile proprii  $a_n$  ale lui  $A$ . Dacă însă sistemul nu este într-o stare proprie a lui  $A$ , atunci este imposibil a prezice care dintre valorile proprii  $a_n$  va fi obținută în urma măsurătorii. Ceea ce poate fi prezis este doar frecvența de obținere a valorii proprii  $a_n$ , atunci când măsurarea se repetă de multe ori pe un set de sisteme identic preparate. Această lipsă a determinismului este complet diferită de fizica clasică și de intuiția noastră umană, ceea ce a și condus la considerații conform cărora mecanica cuantică ar fi o teorie incompletă în care ar trebui să existe și alte variabile, numite *variabile ascunse*, absolut necesare pentru determinarea completitudinii sistemului. Prin urmare, sisteme aparent identice ar fi probabil caracterizate prin valori diferite ale uneia sau mai multor variabile ascunse, care determină, astfel, care valori proprii particulare sunt obținute într-o anumită măsurare. O astfel de teorie deterministă de acest tip a fost propusă de către David Bohm, în 1952 [5], și care era capabilă să explice difracția și interferența care apar la împrăștierea particulei, obținând exact aceleași rezultate ca acelea date de mecanica cuantică, în interpretarea de la Copenhaga, doar că apela la un aparat matematic extrem de complex, motiv pentru care a și fost abandonată.

Pe de altă parte, teoria cuantică s-a dovedit a fi o teorie *nelocală*, adică o teorie în care o acțiune dintr-un loc se transmite instantaneu (aparent, cel puțin mai rapid decât viteza luminii!) pentru a modifica starea cuantică din alt loc. Dar *nelocalitatea* nu se consideră o caracteristică acceptată a unei teorii clasice. Partizanii „variabilelor ascunse” au crezut că se poate construi o teorie cu variabile ascunse suficient de ingenioasă, care să fie și deterministă și locală. Inegalitățile lui Bell și lucrările experimentale ulterioare au invalidat astfel de premise, așa cum vom vedea și din cuprinsul lucrării de față.

În încercarea de a infirma cuantica în formularea de la Copenhaga, Einstein împreună cu colaboratorii săi, B. Podolsky și N. Rosen, propun un experiment mental, publicat în anul 1935 [6], prin care demonstau faptul că descrierea cuantică a naturii era incompletă. Criteriile de bază enunțate de către acești autori care să stea la baza oricărei teorii acceptabile ar fi următoarele [7]:

1. mărimile implicate într-o teorie ar trebui să fie *reale*, realitatea fizică fiind următoarea: dacă putem prezice cu certitudine valoarea unei mărimi fizice, fără a perturba sistemul, atunci există un element al realității fizice corespunzător acestei mărimi fizice;
2. teoria trebuie să fie *locală*, pentru că în natură nu există acțiune la distanță.

Vom prezenta mai jos esența acestui paradox EPR, exemplificând pe o situație mai simplă decât cea propusă de autori, dar care prezintă caracteristici similare. Exemplificarea urmărește caracterul pedagogic și notațiile uzitate în formalismul cuantic, așa cum rezultă și din [7].

Să considerăm, deci, două particule identice, 1 și 2, fiecare având spinul  $\frac{1}{2}$  și care s-au dezintegrat dintr-un sistem cu spinul total  $S = 0$ . După separarea completă a particulelor, măsurăm componenta spinului particulei 1 paralelă cu o direcție definită ca fiind axa  $z$ . Să presupunem că am obținut rezultatul  $+\hbar/2$ . Cum spinul total al sistemului este zero, măsurătoarea componentei  $z$  a spinului particulei 2 trebuie să conducă la rezultatul  $-\hbar/2$ . Observăm, deci, că actul măsurării unei componente a spinului particulei 1 a alterat rezultatul obținut prin măsurarea unei componente a spinului altei particule. Această alterare are loc instantaneu, nedepinzând de distanța dintre particulele 1 și 2, ca și cum acestea ar fi „comunicat” între ele cu o viteză mai mare decât viteza luminii în vid. Acest fapt este cunoscut sub denumirea de *paradoxul EPR*.

### 3. Inegalitățile și teorema lui Bell

Vom considera din nou sistemul nostru cu spin zero [7], compus din particulele 1 și 2 cu spin  $\frac{1}{2}$ . Considerând axa  $z$  ca axă privilegiată, funcția undei de spin este:

$$\chi(1,2) = \frac{1}{\sqrt{2}} [\alpha(1)\beta(2) - \beta(1)\alpha(2)]$$

Componenta spinului particulei 1 într-o anumită direcție dată de vectorul unitate  $\mathbf{a}$  este  $S_a(1)$ , unde

$$S_a(1) = \mathbf{S}(1) \cdot \mathbf{a} = \sigma(1) \cdot \mathbf{a} (\hbar/2)$$

unde  $\sigma(i)$  sunt matricele de spin ale lui Pauli pentru particula  $i$ . Rezultatul unei singure măsurători a lui  $S_a(1)$  este fie  $+\hbar/2$ , fie  $-\hbar/2$ . Aceste valori apar într-un șir de măsurători pe criteriul *fifty-fifty*, astfel încât valoarea medie a lui  $S_a(1)$  este zero. Dacă ambele componente ale spinului particulei 1 de-a lungul lui  $\mathbf{a}$  și cele ale particulei 2 de-a lungul lui  $\mathbf{b}$  sunt măsurate simultan, observabila corespunzătoare este:

$$(\sigma(1) \cdot \mathbf{a} \sigma(2) \cdot \mathbf{b}) \hbar^2 / 4$$

Rezultatul probabil al unei serii de astfel de măsurători ale lui  $S_a(1)$  și  $S_b(2)$  este valoarea medie a acestui operator. Dacă notăm cu  $E(\mathbf{a}, \mathbf{b})$  valoarea medie a lui  $(\sigma(1) \cdot \mathbf{a} \sigma(2) \cdot \mathbf{b})$ , obținem:

$$E(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \langle \chi | \sigma(1) \cdot \mathbf{a} \sigma(2) \cdot \mathbf{b} | \chi \rangle = -\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = -\cos \phi$$

unde,  $\phi$  este unghiul dintre  $\mathbf{a}$  și  $\mathbf{b}$ . Dacă  $\mathbf{a}$  și  $\mathbf{b}$  sunt în aceeași direcție, atunci valoarea lui  $E(\mathbf{a}, \mathbf{b})$  este  $-1$ , ceea ce înseamnă că cele două componente ale spinului sunt ambele de mărime  $\hbar/2$  și de semn opus.

Vom presupune acum că există o variabilă ascunsă  $\lambda$ , care conferă completitudine sistemului nostru și care determină valorile variabilelor cuantice obținute într-un experiment dat. Fiecare sistem cu spin zero are o valoare bine determinată a lui  $\lambda$ . Pentru cazul unui număr mare de asemenea sisteme identic preparate, fie ca o fracție  $p(\lambda)$  să aibă valori ale variabilei ascunse cuprinse între  $\lambda$  și  $\lambda+d\lambda$ , normate, astfel încât:

$$\int p(\lambda) d\lambda = 1, \quad p(\lambda) \geq 0$$

Vom nota prin  $A(\mathbf{a}, \lambda) \hbar/2$  rezultatul unei măsurători a componentei spinului  $S_a(1)$  a particulei 1, pe direcția  $\mathbf{a}$  și prin  $B(\mathbf{b}, \lambda) \hbar/2$  rezultatul măsurării componentei  $S_b(2)$  a particulei 2 pe direcția  $\mathbf{b}$ , unde  $A$  și  $B$  pot lua numai valorile  $\pm 1$ . Cum spinul total al sistemului este zero, trebuie să avem

$$A(\mathbf{a}, \lambda) = -B(\mathbf{b}, \lambda).$$

Într-o teorie *completă*,  $A$  și  $B$  sunt complet specificate prin valoarea lui  $\lambda$ . Într-o teorie *locală*, dacă măsurătorile se efectuează în puncte bine separate, atunci  $A$  poate depinde doar de  $\lambda$  și  $\mathbf{a}$ , dar nu și de  $\mathbf{b}$ . La fel, prin similitudine, și pentru  $B$ : acesta este independent de  $\mathbf{a}$ , astfel încât rezultatul unei măsurări comune a lui  $S_a$  și  $S_b$  este un produs necorelat între  $A$  și  $B$ . Media unei măsurări comune este  $(\hbar^2/4) \Xi(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ , unde

$$\Xi(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \int p(\lambda) A(\mathbf{a}, \lambda) B(\mathbf{b}, \lambda) d\lambda.$$

Am folosit caracterul  $\Xi$  pentru a distinge între mediile calculate prin teoria locală a variabilelor ascunse și rezultatul cuantic din formularea de la Copenhaga. Această expresie este, în

principiu, nefactorizabilă și este corelată, în ciuda faptului că produsul  $A \cdot B$  nu este.

Să observăm că dacă  $a = b$ , atunci avem:

$$\Xi(\mathbf{a}, \mathbf{a}) = E(\mathbf{a}, \mathbf{a}) = -1.$$

Să considerăm acum o măsurare comună a spinului particulei 1 în lungul lui  $a$  și a particulei 2 în lungul lui  $c$ , unde  $c$  este o direcție diferită de  $b$ . În acest caz, avem:

$$\Xi(\mathbf{a}, \mathbf{a}) - \Xi(\mathbf{a}, \mathbf{c}) = \int p(\lambda) \{A(\mathbf{a}, \lambda)B(\mathbf{b}, \lambda) - A(\mathbf{a}, \lambda)B(\mathbf{c}, \lambda)\} d\lambda.$$

Folosind relațiile obținute anterior,  $A(\mathbf{a}, \lambda) = -B(\mathbf{b}, \lambda)$  și  $\{A(\mathbf{a}, \lambda)\}^2 = 1$ , rezultă:

$$\Xi(\mathbf{a}, \mathbf{a}) - \Xi(\mathbf{a}, \mathbf{c}) = \int p(\lambda) \{A(\mathbf{a}, \lambda)A(\mathbf{b}, \lambda) + A(\mathbf{b}, \lambda)B(\mathbf{c}, \lambda)\} d\lambda.$$

Se observă imediat următoarea inegalitate:

$$|\Xi(\mathbf{a}, \mathbf{b}) - \Xi(\mathbf{a}, \mathbf{c})| < \int p(\lambda) \{1 + A(\mathbf{b}, \lambda)B(\mathbf{c}, \lambda)\} d\lambda$$

sau:

$$|\Xi(\mathbf{a}, \mathbf{b}) - \Xi(\mathbf{a}, \mathbf{c})| < 1 + \Xi(\mathbf{b}, \mathbf{c}),$$

deoarece  $A$  ia numai valorile  $\pm 1$ , iar  $p(\lambda)$  este întotdeauna nenegativă. Relația de mai sus reprezintă una dintre familiile de inegalități deduse de către Bell [2], care trebuie satisfăcută de către orice teorie fizică locală și reală.

Având relațiile de mai sus, este ușor de găsit direcțiile  $a$ ,  $b$  și  $c$  pentru care valoarea medie cuantică violează inegalitatea lui Bell. De pildă, fie unghiul dintre  $a$  și  $c$  de valoare  $2\pi/3$  și fie  $b$  cuprins în planul lui  $a$  și  $c$ , făcând un unghi de  $\pi/3$  cu fiecare dintre aceștia. Introducând aceste valori în relațiile de mai sus, obținem următoarele valori medii cuantice:

$$|E(\mathbf{a}, \mathbf{b}) - E(\mathbf{a}, \mathbf{c})| = 1$$

și

$$1 + E(\mathbf{b}, \mathbf{c}) = 1/2$$

din care rezultă inegalitatea

$$|E(\mathbf{a}, \mathbf{b}) - E(\mathbf{a}, \mathbf{c})| > 1 + E(\mathbf{b}, \mathbf{c})$$

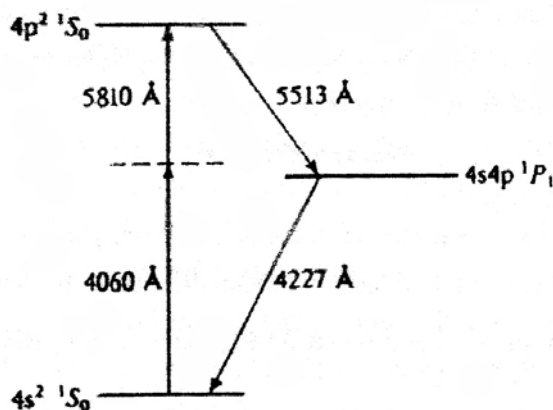
care violează inegalitatea lui Bell și invalidează premisele lui Einstein.

Pe baza inegalităților sale, Bell a enunțat următoarea teoremă: nicio teorie fizică locală cu variabile ascunse nu va putea vreodată să reproducă toate predicțiile mecanicii cuantice. Despre teorema lui Bell, celebrul fizician și filosof, Henry Stapp, de la Laboratoarele Berkely, a spus următoarele: *teorema lui Bell este cea mai profundă descoperire a științei* [29].

#### 4. Experimentul de la Orsay – Paris

După ce Bell a stabilit aceste inegalități, s-a pus problema verificării lor experimentale, mai ales că în joc era una dintre cele mai controversate polemici științifice, care dura deja de câteva decenii, rezultatul final având consecințe fundamentale cu privire la modul nostru de reprezentare a universului înconjurător. Cel mai celebru experiment este cel efectuat de grupul condus de fizicianul Alain Aspect, în anul 1982, la Institutul de Optică din Orsay-Paris [4].

În cadrul acestui experiment laborios [7], A. Aspect și colaboratorii săi au folosit nivelul  $4p^2 \ ^1S_0$  al calciului, care a fost populat prin excitare bifotonică cu două lasere (un laser cu krypton la  $4060 \text{ \AA}$  și un laser acordabil cu colorant la  $5810 \text{ \AA}$ ). Acest nivel se dezexcită, devenind nivelul  $4s^2 \ ^1S_0$  prin cascadă, trecând prin nivelul  $4s4p \ ^1P_1$  (v. figura de mai jos), cu emisia a doi fotoni având lungimile de undă  $5513 \text{ \AA}$  și  $4227 \text{ \AA}$ .

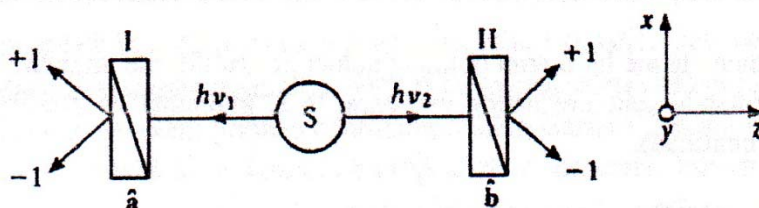


Schema cuantică folosită în experimentul din 1982 a lui A. Aspect [7]

Deoarece momentul cinetic total este zero în ambele niveluri, inițial  $4p^2 \ ^1S_0$  și final  $4s^2 \ ^1S_0$ , momentul cinetic total al sistemului de doi fotoni este tot zero. Prin urmare, dacă fotonii se propagă în direcții opuse paralele cu axa  $y$ , partea de polarizare a funcției de undă este de forma

$$\psi(1,2) = \frac{1}{\sqrt{2}} [u(1)u(2) + v(1)v(2)],$$

unde  $u(i)$  reprezintă un foton polarizat liniar în lungul axei  $x$  și  $v(i)$  un foton polarizat liniar de-a lungul axei  $z$ . Astfel, polarizările sunt complet corelate și se aplică argumente similare celor subliniate în cazul particulelor cu spin  $\frac{1}{2}$ . Schema de principiu a experimentului este ilustrată alăturat.



Schema experimentală folosită de grupul condus de A. Aspect [7]

Se observă faptul că doi fotoni  $h\nu_1$  și  $h\nu_2$  emiși de sursa  $S$  se propagă în direcții opuse, paralele cu axa  $z$  și sunt detectate de analizoarele liniar polarizate, I și II. Aceste analizoare sunt orientate paralel cu vectorii unitate  $\mathbf{a}$  și  $\mathbf{b}$ , care aparțin planelor  $xy$ , normale la direcția de propagare și înregistrează rezultatul  $+1$ , dacă un foton este găsit polarizat liniar paralel cu  $\mathbf{a}$  (sau  $\mathbf{b}$ ) și rezultatul  $-1$ , atunci când polarizarea este normală la  $\mathbf{a}$  (sau  $\mathbf{b}$ ). Apoi, se măsoară ratele de coincidență  $N_{++}(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ ,  $N_{--}(\mathbf{a}, \mathbf{b})$  și  $N_{+-}(\mathbf{a}, \mathbf{b})$  și  $N_{-+}(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ , unde  $N_{++}(\mathbf{a}, \mathbf{b})$  este rata cu care sunt obținute rezultatele  $+1$ , când I este orientat paralel cu  $\mathbf{a}$  și II este orientat paralel cu  $\mathbf{b}$ , simultan. Celelalte rate se definesc în mod similar. Se poate defini un *coeficient de corelație*  $E(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ , în termenii ratelor de coincidență, sub forma expresiei de mai jos:

$$E(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \frac{N_{++}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) + N_{--}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) - N_{+-}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) - N_{-+}(\mathbf{a}, \mathbf{b})}{N_{++}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) + N_{--}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) + N_{+-}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) + N_{-+}(\mathbf{a}, \mathbf{b})}$$

Acest coeficient poate fi calculat în formalismul cuantic pentru spin  $\frac{1}{2}$  și care pentru cazul de față are expresia

$$E(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \cos 2\phi$$

unde  $\phi$  este unghiul dintre  $\mathbf{a}$  și  $\mathbf{b}$ .

Acum, coeficientul de corelație  $\Xi(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ , corespunzător unei teorii locale și reale de variabilă ascunsă, se află urmând un raționament similar cu cel de mai sus pentru cazul particulelor cu spin  $1/2$  [7]. Astfel, introducem o variabilă ascunsă  $\lambda$ , precum și o funcție de densitate  $p(\lambda)$ . Rezultatul unei măsurători de polarizație, atunci când analizorul I este paralel cu  $\mathbf{a}$ , se notează prin  $A(\mathbf{a}, \lambda)$ , care poate lua valorile  $+1$  sau  $-1$ , în timp ce  $B(\mathbf{b}, \lambda)$  este mărimea corespunzătoare pentru măsurători prin analizorul II. În acest caz, funcția de corelație  $\Xi(\mathbf{a}, \mathbf{b})$  va fi dată de expresia:

$$\Xi(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \int p(\lambda) A(\mathbf{a}, \lambda) B(\mathbf{b}, \lambda) d\lambda$$

Pentru configurația experimentală aleasă, grupul de fizicieni a mai definit și expresia:

$$S = \Xi(\mathbf{a}, \mathbf{b}) - \Xi(\mathbf{a}, \mathbf{b}') + \Xi(\mathbf{a}', \mathbf{b}) + \Xi(\mathbf{a}', \mathbf{b}'),$$

unde  $\mathbf{a}, \mathbf{a}', \mathbf{b}, \mathbf{b}'$ , reprezintă două orientări diferite ale analizoarelor I și II. Astfel, obținem relativ ușor inegalitatea lui Bell:

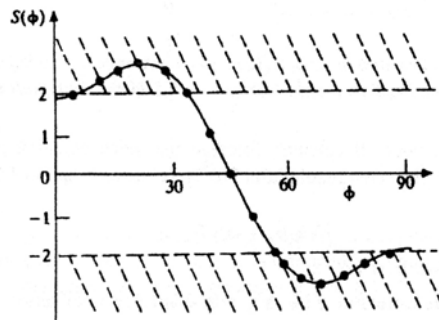
$$-2 \leq S \leq 2$$

cu condiția ca  $A$  și  $B$  să poată lua numai valorile  $+1$  sau  $-1$ . Pe de altă parte, dacă  $\Xi$  este înlocuit prin corelațiile cuantice corespunzătoare  $E$ , atunci  $S$  poate depăși valoarea 2, pentru diverse orientări ale celor patru vectori  $\mathbf{a}, \mathbf{a}', \mathbf{b}, \mathbf{b}'$ . Orientările alese de către grupul condus de Aspect au fost cele care respectă relația:

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = \mathbf{b} \cdot \mathbf{a}' = \mathbf{a}' \cdot \mathbf{b}' = \cos \phi$$

$$\text{și } \mathbf{a} \cdot \mathbf{b}' = \cos 3\phi.$$

Valorile experimentale ale lui  $S$  au fost obținute pentru diferite unghiuri cuprinse între  $0^\circ$  și  $90^\circ$ , iar rezultatele sunt prezentate în figura de mai jos, împreună cu predicțiile mecanicii cuantice (curba continuă):



Reprezentarea datelor experimentale obținute pentru  $S(\phi)$ .

Zonele hașurate reprezintă violarea inegalității lui Bell.

Curba continuă corespunde predicțiilor mecanicii cuantice [7]

Se observă clar faptul că rezultatele experimentale violează inegalitățile lui Bell, fiind într-o excelentă concordanță cu predicțiile mecanicii cuantice formulate de grupul de la Copenhaga, condus de Niels Bohr. Prin urmare, se poate trage concluzia că nicio teorie locală cu variabilă ascunsă nu poate sta la baza mecanicii cuantice, așa cum este ea formulată în prezent.

## 5. Excurs metafizic

Să recapitulăm mai întâi principalele idei de esență aproape metafizică pe care le-a consemnat istoria fizicii din veacul trecut și care a produs cel mai mare salt cognitiv din istoria gândirii umane.

Prin anii 1920, un grup de creiere de excepție s-au adunat la Copenhaga, în jurul marelui fizician Niels Bohr, pentru a pune la punct un model complet al naturii elementare a materiei, pe baza rezultatelor obținute până la acea vreme de către comunitatea științifică și care s-a numit ulterior *interpretarea de la Copenhaga*. În esență, Werner Heisenberg și Max Born, au subliniat faptul că unda în fizica cuantică nu este o undă în sens clasic, obișnuit, ci este o *undă de probabilitate*. Drept consecință cognitivă, nimic nu există până în clipa în care nu este observat!...sau, altfel spus, dacă ceva există, acel ceva există pentru a fi observat!.. Orice particulă, deci, are o probabilitate de a se afla într-un loc sau altul din univers, ea este “întinsă ca untul” [8] în toate punctele posibile de existență a ei. În momentul observării ei, particula ia o decizie cu privire la locul în care să se poziționeze. Altfel spus, fiecare particulă are o funcție de undă care conține toate posibilitățile ei de localizare, funcție de undă care colapsează în momentul în care este observată și măsurată. Deci, din perspectiva școlii de la Copenhaga, realitatea este creată prin observație,...deci gândul modifică realitatea din jurul nostru. Dacă nu există observator, atunci nu există nici realitate, ci doar un imens vid în care plutesc undele de probabilități, care așteaptă să colapseze în prezența unui observator conștient. Prin urmare, fiecare dintre noi vede propria sa versiune a realității, transformând probabilitatea și funcția de undă asociată în propria sa realitate fizică.

În anul 1935 se produce o mare tulburare în lumea fizicienilor de atunci, prin apariția deja celebrului *paradox EPR* (Einstein, Podolsky, Rosen), care a condus la cea mai mare controversă din lumea științifică de atunci, cea dintre Bohr și Einstein. Pentru Einstein era de neacceptat ideea celor de la Copenhaga, care susțineau că în lumea subatomică o particulă poate trece de la starea de undă de stări probabile într-o stare punctuală efectivă și în plus măsurabilă din punct de vedere fizic și accesibilă fiind oricărui observator. Acest fenomen îi părea lui Einstein complet irațional; el nega faptul că o realitate materială pur și simplu nu există dacă nu este privită, exprimându-se cândva, într-un cerc de prieteni, că nu poate să creadă că Luna nu ar exista, dacă el nu s-ar uita la ea. Einstein considera mai degrabă că trebuie să existe un nivel mai profund și mai ascuns al realității observate, care ne scapă deocamdată, că ar fi necesară o teorie cu *variabile ascunse* care să descrie realitatea subatomică și în care să prevaleze bunul simț uman. Aceste considerente au condus la elaborarea aceluiași experiment mental publicat în anul 1935 [6] și care exprima critica deschisă și severă a autorilor împotriva realității bazate pe observație a celor de la Copenhaga. Altfel spus, paradoxul EPR, la vremea publicării, ridiculiza într-un fel teoria lui Bohr. Einstein nu credea în existența unei acțiuni fantomatice la distanță, ci doar într-o chestiune de ipoteză logică simplă, atunci când se vorbește de spinul *up* al unei particule și instantaneu cealaltă particulă capătă spinul *down*, cele două particule fiind separate spațial la o distanță oricât de mare.

Paradoxul EPR a constituit vreme de aproape trei decenii dovada rațională a faptului că fizica cuantică în versiunea de la Copenhaga, în ciuda rezultatelor practice pe care le producea, avea totuși ceva profund greșit în ea. Partizanii lui Einstein refuzau să creadă că realitatea materială are nevoie să fie observată, pentru a exista.

Anul 1964 este anul când mintea ascuțită a irlandezului John Stewart Bell zguduie din temelii apriorismele critice ale lui Einstein și tranșează conflictul celor două școli în favoarea școlii de la Copenhaga [2]. Lucrarea teoretică a lui Bell a fost cu adevărat revoluționară, stabilind un set de inegalități pe care imaginația fizicienilor nu a întârziat să le verifice experimental. În abordarea sa, Bell s-a așezat confortabil în ipotezele lui Einstein. Așa cum se observă și din lucrarea de față, Bell a presupus că Einstein are dreptate și că obiectele din lumea noastră nu au nevoie să fie observate

pentru a exista. Mai mult decât atât, Bell a mai presupus că atunci când două particule cuantice sunt separate spațial, modificarea stării unei particule nu modifică în niciun fel starea celeilalte particule. Prin urmare, putem spune că prima ipoteză de lucru a lui Bell o putem numi *realitate*, iar a doua ipoteză s-ar numi *separabilitate*. Pentru validarea ipotezelor celor din școala de la Copenhaga, aceste observabile trebuie să fie inegale, deci una dintre acestea trebuie să fie mai mare decât cealaltă. Inegalitatea lui Bell a validat predicția celor de la Copenhaga și a invalidat definitiv predicțiile partizanilor lui Einstein [2], [4], [8].

O teorie atât de elegantă cum era cea a lui Bell impunea o cel puțin la fel de elegantă confirmare experimentală. Aceasta a avut loc în anul 1982, la Orsay – Paris, într-un experiment realizat de către un grup de fizicieni condus de A. Aspect, care au implementat o versiune reală a paradoxului EPR și au verificat practic, prin rezultatele obținute, inegalitatea lui Bell [4]. Concluzia este mai mult decât evidentă: dacă două particule cuantice sunt corelate, sau *entangled*, modificarea stării uneia va atrage instantaneu modificarea stării celeilalte. Un singur eveniment din trecut, va lega viitorul celor două particule entangled pentru totdeauna. Evoluția uneia va depinde de evoluția celeilalte.

În anul 1998, alte lucrări experimentale pline de ingeniozitate, realizate la Universitatea din Geneva, au demonstrat *entanglarea* nelocalizată a fotonilor pe 11 km de fibră optică, iar în anul 2004 pe distanța de 50 km [9], [10].

Sporul cognitiv realizat de aceste experimente este uriaș și fără precedent în istoria omenirii. Toate aceste realizări demonstrează faptul că la un nivel foarte profund al realității, totul este legat de tot restul, că totul este doar o parte din ceva colosal de mare și în care comunicarea este instantanee, indiferent cât de departe se află componentele întregului. Separabilitatea este o iluzie, obiectele din spațiu sunt nelocalizate, fiind parte ale unui singur întreg. Altfel spus, particulele *entangled* își pot cunoaște reciproc starea cuantică nu pentru că ar comunica între ele în baza unei acțiuni fantomatice la distanță, ci pentru că sunt ipostaze ale unui singur întreg.

*Nonlocalitatea* este o trăsătură cuantică a acestui univers. Ea sugerează, deci, faptul că dacă două sisteme cuantice interacționează, atunci funcțiile lor de undă devin *entangled* fizic, adică dacă una din funcțiile de undă colapsează, cealaltă va colapsa și ea instantaneu, indiferent de distanța care le separă. Folosirea în comun a funcției de undă face ca aceste două sisteme cuantice să devină de fapt unul și același sistem. Dar numărul de funcții de undă este nelimitat. Acest fapt sugerează faptul că în primele nanosecunde ale Big-Bang-ului, toată materia a căpătat existență dintr-o singularitate, toate particulele care au țâșnit în toate direcțiile au provenit din aceeași singularitate cosmică. Prin urmare, toate entitățile materiale care există în univers sunt *entangled*. Generalizând, putem afirma faptul că noi, toți, suntem parte din ceilalți, iar ceilalți sunt parte din noi. Întregul nostru univers este *entangled*.

## 6. Concluzii

Entanglementul cuantic ocupă în prezent un domeniu de cercetare prioritar în rândul comunității fizicienilor, tocmai datorită succeselor experimentale obținute până acum și care au confirmat existența acestui fenomen [9], destul de bizar la prima vedere. Astfel, la ora actuală putem vorbi de o adevărată avalanșă de experimente, care au confirmat existența acestui fenomen cuantic, pe fotonii [11], [12], [13], [14], pe neutrino [15], pe electroni [16], [17], pe molecule [18], [19] și chiar pe diamante [20].

Preocuparea uriașă de care se bucură acest fenomen cuantic în rândul fizicienilor se datorează și potențialului aplicativ pe care acesta îl dovedește că îl are. Merită să amintim pe scurt: teleportarea cuantică, adică procesul prin care starea cuantică a unui foton sau atom poate fi transmisă între două repere spațiale cu ajutorul comunicațiilor clasice și a unei prealabile entanglări cuantice partajate între cele două repere din spațiu [21], [22], calculatoarele cuantice care folosesc fenomene cuantice cum ar fi superpoziția și entanglementul cuantic în vederea realizării de operații cu date [23], [24], criptografia cuantică [25], sau internetul cuantic considerat ca fiind viitoarea platformă de prelucrare a informației și a comunicațiilor complet securizate [26], un prim experiment crucial fiind efectuat în aer liber, între două insule Canare, pe distanța de 143 km, între



satelit și stația terestră [27], folosind teleportarea și entanglarea cuantică.

O altă aplicație inedită de cercetare este cea legată de timp. Astfel, studii recente arată faptul că timpul este un fenomen de entanglement cuantic [28], că acesta este un fenomen emergent pentru observatorii “interni”, dar complet absent pentru cei externi, că fenomenul de entanglarea cuantică poate fi utilizat în a descrie curgerea timpului.

## BIBLIOGRAFIE

1. \*\*\* [http://www.physicsoftheuniverse.com/topics\\_quantum\\_nonlocality.html](http://www.physicsoftheuniverse.com/topics_quantum_nonlocality.html);
2. **BELL, J. S.:** On the Einstein Podolsky Rosen Paradox. *Physics*. **1** (3): 195–200 (1964);
3. **STUART, J.; FREEDMAN; CLAUSER, J. F.:** Experimental Test of Local Hidden-Variable Theories *Phys. Rev. Lett.* **28**, 938, 1972;
4. **ASPECT, A. et al.:** Experimental Realization of Einstein–Podolsky–Rosen–Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell's Inequalities. *Phys. Rev. Lett.* **49**: 91–94 (1982);
5. **BOHM, D.:** A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of "Hidden" Variables. *Phys. Rev.* **85**, 166, (1952);
6. **EINSTEIN, A.; PODOLSKY, B.; ROSEN, N.:** Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Phys. Rev.* **47**, 777 (1935);
7. **BRANSDEN, B. H.; JOACHAIN, C. J.:** Introducere în mecanica cuantică. Editura Tehnică, 1995, 1999;
8. **PEAKE, A.:** Experiențe extracorporale. Istoria și știința călătoriilor astrale. Lifestyle Publishing, Grupul Editorial Trei, 2013;
9. \*\*\* [http://en.wikipedia.org/wiki/quantum\\_entanglement](http://en.wikipedia.org/wiki/quantum_entanglement);
10. **PENROSE, R.:** The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe. London, 2004, p. 603;
11. **ZEILINGER, A. et al.:** New High-Intensity Source of Polarization-Entangled Photon Pairs, *Physical Review Letters*. **75**: 4337–4341 (1995);
12. **ZHAO, ZHI et al.:** Experimental demonstration of five-photon entanglement and open-destination teleportation. *Nature*. **430**: 54–58. July 2004;
13. **CHAO-YANG LU et al.:** Experimental entanglement of six photons in graph states, *Nature Physics*. **3**: 91–95 (2007);
14. **XING-CAN YAO et al.:** Observation of eight-photon entanglement. *Nature Photonics*. **6**: 225–228 (2012);
15. **FORMAGGIO, J. A.; KAISER, D. I.; MURSKYJ, M. M.; WEISS, T. E.:** Violation of the Leggett-Garg inequality in neutrino oscillations. *Phys. Rev. Lett* (2016);
16. **HENSEN, B.; et al.:** Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres. *Nature*. **526**: 682–686 (2015);
17. **MARKOFF, J.:** Sorry, Einstein. Quantum Study Suggests 'Spooky Action' Is Real. *New York Times*. (Retrieved 21 October 2015);
18. **ARNDT, M. et al.:** Wave–particle duality of C<sub>60</sub> molecules. *Nature*. **401**: 680–682. 14 October 1999;
19. **NAIRZ, O.; ARNDT, M.; ZEILINGER, A.:** Quantum interference experiments with large molecules. *American Journal of Physics*, **71** (April 2003) 319–325;
20. **LEE, K. C.; SPRAGUE, M. R.; SUSSMAN, B. J.; NUNN, J.; LANGFORD, N. K.; JIN, X.- M.; CHAMPION, T.; MICHELBERGER, P.; REIM, K. F.; ENGLAND, D.;**

- JAKSCH, D.; WALMSLEY, I. A.** Entangling macroscopic diamonds at room temperature, *Science*. 334 (6060): 1253–1256 (2 December 2011);
21. **BENNETT, C. H.; BRASSARD, G.; CRÉPEAU, C.; JOZSA, R.; PERES, A.; WOOTTERS, W. K.**: Teleporting an Unknown Quantum State via Dual Classical and Einstein–Podolsky–Rosen Channels. *Phys. Rev. Lett.* 70, 1895–1899 (1993);
  22. **ZEILINGER, A.**: *Dance of the Photons*. Farrar, Straus and Giroux, New York, 2010;
  23. **BENIOFF, P.**: The computer as a physical system: A microscopic quantum mechanical Hamiltonian model of computers as represented by Turing machines. *Journal of statistical physics*. 22 (5): 563–591 (1980);
  24. **DEUTSCH, D.**: Quantum Theory, the Church-Turing Principle and the Universal Quantum Computer. *Proceedings of the Royal Society of London A*. 400 (1818): 97–117(1985);
  25. **BENNETT, C.H.; BRASSARD, G.**: Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing. In *Proceedings of IEEE International Conference on Computers, Systems and Signal Processing*, volume 175, page 8. New York, 1984;
  26. **KIMBLE, H. J.**: The Quantum Internet. *Nature*, 453, 1023–1030 (2008);
  27. **XIAO-SONG, M.A.; HERBST, T.; SCHEIDL, T.; DAQING WANG; KROPATSCHEK, S.; NAYLOR, W.; WITTMANN, B.; MECH, A.; KOFLER, J.; ANISIMOVA, E.; MAKAROV, V.; JENNEWEIN, T.; URSIN R.; ZEILINGER, A.**: Quantum teleportation over 143 kilometres using active feed-forward, *Nature*, 489, 269–273, (2012);
  28. **MOREVA, E.; BRIDA, G.; GRAMEGNA, M.; GIOVANNETTI, V.; MACCONE, L; G ENOVESE, M.**: Time from quantum entanglement: An experimental illustration, *Physical Review A*, Volume 89, Issue 5 /2014;
  29. **STAPP, H. P.**: Bell's Theorem and World Process, *Nuovo Cimento*, 29B (2): 270–276(1975).