

## Premiul Nobel pentru fizică pe 2022 onorează trei exploratori ai fundamentelor straniei lumi cuantice

Titus Adrian Beu  
Universitatea "Babeş-Bolyai"  
Facultatea de Fizică  
Departamentul de Fizică Biomoleculară

Notă: Termenul "entanglement" din limba engleză joacă un rol central în mecanica cuantică. În limbaj laic "entangled" se traduce prin "încurcat", "încâlcit", "amestecat", "prins (în mreje)". Deoarece este folosit pentru a descrie un tip complex de cuplaj între particulele cuantice, care se manifestă în absența unor câmpuri de forțe cunoscute, traducerea prin "cuplaj/cuplat" este ambiguă. Pentru a nu introduce confuzii vom folosi termenii "entanglement/entanglat".

Academia Regală Suedeză de Științe a acordat Premiul Nobel pentru Fizică pentru anul 2022 prestigioșilor oameni de știință:

Alain Aspect, profesor la Université Paris-Saclay și École Polytechnique, Palaiseau, Franța  
John F. Clauser, cercetător la J.F. Clauser & Assoc., Walnut Creek, CA, SUA  
Anton Zeilinger, profesor la Universitatea din Viena, Austria

„pentru experimente cu fotoni entanglați, stabilirea încălcării inegalităților Bell și pionierat în știința informației cuantice”.

Cercetările inovatoare cu fotoni entanglați, desfășurate independent de cei trei laureați, au elucidat aspecte fundamentale ale comportamentului cuantic, aflate timp de decenii în dezbateră aprinsă, cum ar fi completitudinea teoriei cuantice. Demonstrând că informația cuantică poate fi transmisă securizat pe distanțe apreciabile, fenomen cunoscut ca "teleportare cuantică", ei au contribuit hotărâtor și la punerea bazelor domeniilor comunicațiilor cuantice și calculului cuantic, aflate astăzi într-o dezvoltare spectaculoasă. În cuvintele Comitetului Nobel pentru fizică: „Dezvoltarea de către laureați de instrumente experimentale a pus bazele unei noi ere a tehnologiei cuantice.”

Conceptul central al cercetărilor premiate - "entanglementul cuantic" - se referă la fenomenul cuantic cel mai contraintuitiv, fără analog în fizica clasică, și care a provocat dispute aprinse în cei aproape 100 de ani de utilizare a mecanicii cuantice. El definește situația în care într-o pereche de particule generate împreună, starea uneia dintre particule nu poate fi descrisă în mod individual, independent de starea celeilalte, indiferent cât de mare devine distanța dintre ele. La nivel formal, funcția de undă a perechii nu poate fi factorizată în funcții separate pentru fiecare particulă.

Într-un sens larg, particulele entanglate conservă o anumită proprietate comună (de exemplu, spin total sau polarizare), astfel încât modificarea stării uneia dintre particule determină colapsarea instantanee a celeilalte într-o stare compatibilă, independent de distanță. Astfel, entanglementul permite ca, măsurând proprietatea conservată asupra uneia dintre particule, să se cunoască rezultatul măsurării asupra celeilalte particule, fără a fi în proximitatea ei și a efectua efectiv măsurătoarea. Aceasta este tocmai fenomenologia care stă la baza noilor tehnologii de "teleportare cuantică" de informație.

## Context conceptual și istoric

Dacă Erwin Schrödinger, căruia i se datorează stabilirea ecuației cuantice a undelor, considera în 1935 entanglementul ca fiind trăsătura definitorie a mecanicii cuantice, Albert Einstein denumea acest fenomen în mod ironic "interacțiune fantomatică la distanță".

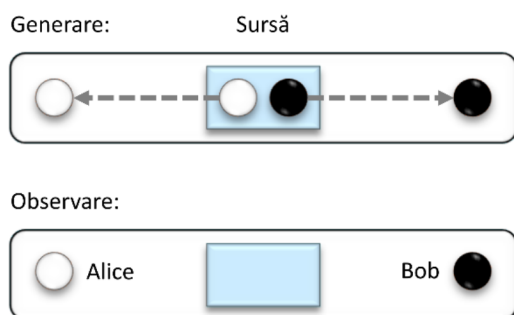
Într-o imagine simplificată, generarea de perechi de particule entanglate este similară unui dispozitiv care aruncă în mod aleator perechi de mingi de culori diferite, una albă și una neagră (sau invers), în direcții opuse către doi observatori, Alice și Bob (Figura 1). Dacă Alice primește o minge albă, știe cu siguranță (chiar fără să verifice) că Bob a primit o minge neagră, și invers.

Conform fizicii clasice (Figura 1a), fiecare minge are o culoare bine definită, de la lansarea din dispozitiv și până când ajunge la observator, indiferent dacă este privită (observată), sau nu. Culoarea mingii este considerată proprietate intrinsecă și element al realității. Această presupunere este adesea numită *ipoteza realismului*. Pe de altă parte, se consideră că rezultatul observat de Alice nu poate influența rezultatul observației lui Bob, și invers, ceea ce este cunoscut ca *ipoteza localității*.

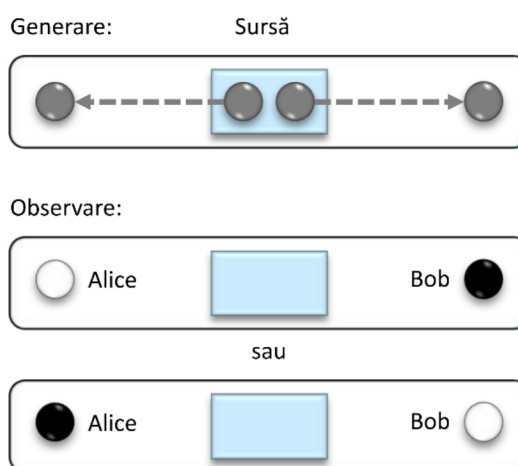
Conform mecanicii cuantice (Figura 1b), în așa-numita *interpretare de la Copenhaga* (datorată în principal lui Niels Bohr și Werner Heisenberg, și în prezent aproape general acceptată), fiecare dintre particulele entanglate este produsă nu într-o stare bine definită, ci într-un amestec al stărilor posibile (particulă albă + particulă neagră = particulă gri). Nedeterminarea și amestecul de stări se păstrează până când un observator "interacționează" cu particula, o "observă", sau, într-un sens mai larg, efectuează o măsurătoare asupra ei, determinând "colapsarea" ei aleatoare într-una dintre stările posibile, albă sau neagră. La o singură observație nu se poate anticipa în care dintre stări va colapsa particula, dar, într-o serie foarte lungă de măsurători, particula se va prezenta statistic în jumătate dintre cazuri în starea albă, și în jumătate, în cea neagră. În oricare dintre cele două situații posibile, odată observată propria particulă, fiecare dintre cei doi observatori va cunoaște instantaneu starea (complementară) în care a colapsat particula pereche.

Mai mult, dacă se măsoară nu o singură proprietate a unei particule (alb/negru), ci două proprietăți complementare (de exemplu, poziție și impuls), conform *principiului de incertitudine* formulat de Werner Heisenberg în 1927, cu cât se determină mai precis una dintre mărimi, cu atât devine mai

### a) Interpretare clasică



### b) Interpretare cuantică



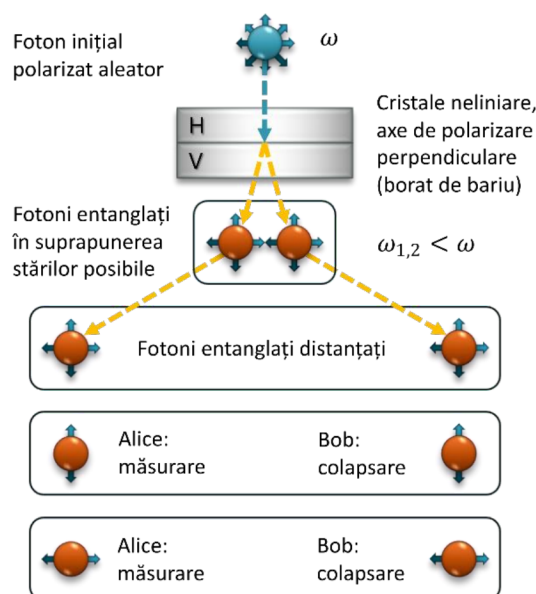
**Figura 1** Generarea și observarea perechilor de particule entanglate potrivit: a) interpretării clasice și ipotezei variabilelor ascunse, b) interpretării mecanicii cuantice.

imprecisă măsurarea celeilalte, contrar mecanicii clasice, în care ambele pot avea simultan valori bine determinate.

Deși prin elaborarea teoriei efectului fotoelectric a contribuit la începutul secolului 20 la punerea bazelor teoriei cuantice vechi, Albert Einstein a devenit treptat un adversar al interpretării de la Copenhaga și al caracterului probabilistic al predicțiilor cuantice, formulând celebrul aforism "Dumnezeu nu joacă zaruri!".

Într-o lucrare celebră din 1935, scrisă împreună cu Boris Podolsky și Nathan Rosen, Einstein considera că poziția și impulsul unei particule trebuie să fie "elemente ale realității", existente independent de procesul de măsurare. Autorii au argumentat că, în spatele incertitudinii cuantice trebuie să existe "variabile ascunse" (informații secrete purtate de particule), care predetermină măsurătorile și care nu sunt luate în considerare în mecanica cuantică. Mai mult, posibilitatea ca măsurarea unei particule să afecteze instantaneu măsurarea altei particule, aflată la orice distanță, permitea ca informația să fie transmisă cu viteză mai mare decât cea a luminii, ceea ce contravenea teoriei relativității elaborate de Einstein. Einstein, Podolsky și Rosen au formulat un experiment mental, cunoscut ca paradoxul Einstein-Podolsky-Rosen (EPR), care urmărea să pună sub semnul întrebării formularea existenței a mecanicii cuantice, ca fiind o *teorie incompletă*, și a sugerat necesitatea unei *teorii cu variabile ascunse*, care să reflecte conceptul de *realism local*.

În 1964, fizicianul nord-irlandez John Bell a propus un test menit să discrimineze în descrierea perechilor entanglate între predicțiile probabilistice non-locale ale mecanicii cuantice și o posibilă teorie locală cu variabile ascunse. Bell a pornit de la faptul că, și dacă stările individuale pentru două particule entanglate sunt incerte (în absența unei măsurători), ele sunt totuși complet corelate. De exemplu, un foton poate fi polarizat orizontal, vertical sau, conform mecanicii cuantice, în ambele direcții simultan, ceea ce lasă polarizarea incertă. Cu toate acestea, doi fotoni entanglați vor avea în mod cert direcții de polarizare corelate, chiar dacă polarizarea lor individuală nu este cunoscută, (Figura 2).



**Figura 2** Generarea perechilor de fotoni entanglați prin conversie parametrică spontană. Un foton de frecvență  $\omega$  se descompune în doi fotoni de frecvență inferioară. Un foton "neobservat" poate exista în toate stările posibile simultan. Odată fixată starea unuia dintre fotoni prin măsurare, celălalt colapsează în starea complementară. Transferul stării de la Alice la Bob pare să se producă cu viteză mai mare decât viteza luminii (instantaneu), indiferent de distanță.

Bell a imaginat un experiment în care doi observatori, Alice și Bob, împart perechi de fotoni entanglați. Fiecare are un analizor de polarizare orientabil, care lasă să treacă doar fotoni cu o anumită direcție de polarizare. Dacă analizoarele sunt paralele între ele, corelațiile dintre măsurătorile lui Alice și Bob sunt de 100%. Pentru orice alte orientări relative, corelațiile scad la o valoare inferioară. Bell a arătat că dacă măsurătorile sunt locale și rezultatul lor este predeterminat de variabilele ascunse, corelațiile rămase nu pot depăși o anumită valoare maximă. Bell a exprimat acest rezultat sub forma unei teoreme și unei inegalități care îi poartă numele. Pe cale de consecință, *violarea inegalității Bell* prin corelații experimentale superioare limitei prevăzute este o indicație a validității descrierii cuantice.

Bell a subliniat că nicio teorie locală cu variabile ascunse nu ar putea reproduce toate rezultatele mecanicii cuantice, afirmând că "Dacă o teorie cu variabile ascunse este locală, nu va fi în acord cu mecanica cuantică, iar dacă este în acord cu mecanica cuantică, nu va fi locală.

Chiar dacă, datorită unor presupuneri insuficient de realiste despre detectoare și unor *ambiguități* (engl. "loophole") conceptuale, experimentul și inegalitatea Bell s-au dovedit insuficient de potrivite pentru verificări experimentale reale, ele stau la baza unei serii remarcabile de dezvoltări ulterioare, care au demonstrat fără echivoc corectitudinea și completitudinea mecanicii cuantice în interpretarea de la Copenhaga.

### Contribuții majore ale laureaților

O parte semnificativă a cercetărilor recompensate în acest an cu Premiul Nobel pentru fizică vizează investigarea inegalităților de tip Bell, cu scopul de a stabili dacă măsurătorile particulelor entanglate se supun predicțiilor probabilistice non-locale ale mecanicii cuantice, sau unor variabile ascunse.

În 1969, John Clauser, pe atunci masterand la Universitatea Columbia, a rafinat ideile lui John Bell împreună cu Michael Horne, Abner Shimony și Richard Holt, propunând o variație a inegalității Bell (inegalitatea CHSH) care se preta la verificări efective prin experimente reale cu fotoni entanglați. Presupunând că Alice și Bob măsoară nu o singură mărime, ci câte două (de exemplu, proiecțiile polarizării sau spinului după două axe), cu rezultatele  $A_1$  și  $A_2$  în cazul lui Alice, și  $B_1$  și  $B_2$  în cazul lui Bob, și notând cu  $\langle \quad \rangle$  corelațiile medii ale perechilor de măsurători, inegalitatea Bell CHSH se scrie:

$$\langle A_1 B_1 \rangle + \langle A_1 B_2 \rangle + \langle A_2 B_1 \rangle - \langle A_2 B_2 \rangle \leq 2$$

Satisfacerea ei confirmă existența variabilelor ascunse, care predetermină local rezultatele măsurătorilor, iar violarea ei confirmă corectitudinea predicțiilor probabilistice non-locale ale mecanicii cuantice.

În 1972, John Clauser și colegul său masterand Stuart Freedman au fost primii care, la Universitatea din California, Berkeley, au testat cu un nivel de acuratețe statistică ridicat inegalitatea Bell CHSH, efectuând experimente cu perechi de fotoni entanglați emiși de atomi de calciu în direcții opuse, cărora le-au măsurat polarizarea. John Clauser mărturisește că era sceptic cu privire la validitatea teoriei cuantice și anticipa confirmarea punctului de vedere al lui Einstein. Cu toate acestea, magnitudinea corelațiilor de polarizare obținute încălca în mod clar inegalitatea Bell CHSH, ceea ce confirma faptul că teoria cuantică oferă o descriere non-locală completă a realității și invalida ipoteza variabilelor ascunse.

În ciuda acestui prim succes în testarea inegalităților de tip Bell, datorat în mare măsură îmbunătățirilor semnificative față de experimentul propus inițial de Bell, în aranjamentul experimental al lui Clauser și Freedman persistau ambiguități care puneau sub semnul întrebării validitatea concluziilor. O posibilă deficiență, numită "ambiguitatea localității", implica faptul că între instrumentele de laborator s-ar fi putut scurge informații, mimând non-localitatea entanglementului.

O altă ambiguitate deriva din faptul că, filtrele de polarizare ale celor doi observatori fiind orientate la unghiuri fixe, se putea specula că ar fi putut să predetermine rezultatele prin selectarea preferențială a particulelor puternic corelate în detrimentul celorlalte, lăsând astfel loc pentru interpretări ale entanglementului bazate pe variabilele ascunse. John Clauser și-a petrecut următorii ani căutând să identifice și să elimine și alte posibile ambiguități.

În 1982, Alain Aspect, pe atunci doctorand la Universitatea Paris-Saclay, Franța, a întreprins împreună cu echipa sa noi teste ale inegalității Bell, cu un grad de precizie și confidență superior, rafinând în mai multe etape configurația lui Clauser și Freedman și eliminând succesiv ambiguitățile identificate.

Astfel, pentru a îmbunătăți statistica, au fost produși fotoni entanglați cu rate superioare prin perfecționarea tehnicii de excitare a atomilor sursă, fiind măsurați atât fotonii care treceau prin filtre, cât și cei blocați. Pentru a elimina suspiciunea că orientarea fixă a filtrelor care analizează fotonii predetermină rezultatele, echipa a utilizat un dispozitiv de comutare care schimba periodic aranjamentul, alegând în nanosecunde între diferite orientări ale filtrelor. Comutarea realizându-se după ce perechile entanglate părăseau sursa, în timp ce fotonii erau în zbor, nu lăsa timp pentru ca informația despre filtrul la care vor ajunge fotonii să influențeze modul în care fuseseră emiși, și nici ca informația de la unul din filtre să influențeze rezultatul măsurării la celălalt. Se excludea astfel șansa că setările experimentale existente în momentul emisiei perechii să fi putut afecta rezultatul măsurării.

Deși Alain Aspect se aștepta, ca și John Clauser, ca Einstein să aibă dreptate, violarea clară a inegalității Bell în măsurătorile sale a întărit și mai mult ideea că mecanica cuantică este o teorie completă și că efectele cuantice nu pot fi explicate prin existența unor variabile ascunse.

O deficiență rămasă în experimentele lui Aspect este aceea că, direcțiile de polarizare ale filtrelor fiind selectate într-un mod regulat și, prin urmare, previzibil, informația ar fi putut fi transferată fotonilor sau filtrelor, posibil rezultând într-un fel de determinare.

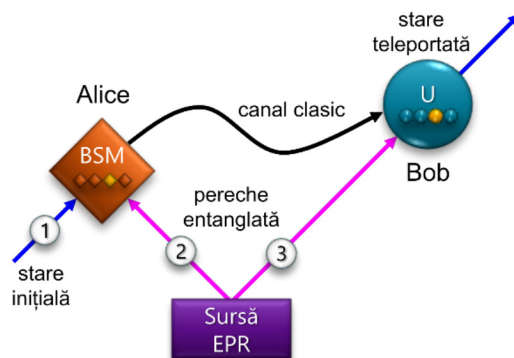
Ultima ambiguitate majoră pentru testele Bell a fost eliminată abia în 2015 de Ronald Hanson și colaboratorii săi, reușindu-se experimente fără ambiguități care au confirmat violarea inegalității Bell pentru spini electronici separați la o distanță de peste 1 km.

Toate testele Bell efectuate până în prezent au demonstrat fără echivoc că sistemele fizice se supun mecanicii cuantice, ca teorie completă care nu necesită variabile ascunse pentru a explica observațiile.

În timp ce Clauser și Aspect au folosit entanglementul pentru a demonstra aspecte legate de fundamentele mecanicii cuantice, Anton Zeilinger, profesor la Universitatea din Viena, a realizat împreună cu grupul său cercetări de pionierat în utilizarea entanglementului ca instrument pentru "teleportarea" informației cuantice între particule entanglate aflate în locații îndepărtate.

În 1997, Zeilinger a folosit entanglementul pentru a realiza o primă demonstrație practică a fenomenului de teleportarea cuantică (Figura 3). Starea unei particule (1) a fost transferată de la Alice la Bob utilizând ca și canal cuantic de comunicare o pereche de particule entanglate auxiliare (2 și 3).

În 1998, Zeilinger a rafinat experimentele de tip Bell realizate anterior, folosind numere aleatoare pentru a selecta direcțiile măsurătorilor de polarizare, comutarea realizându-se în timp ce particulele entanglate se aflau în zbor. Într-o variantă mai recentă a experimentului, în locul generatorului de numere aleatoare au fost folosite semnale de la quasari din galaxii îndepărtate pentru a asigura un control autentic aleator al filtrelor și a elimina orice determinare posibilă.



**Figura 3** Principiul teleportării cuantice. Alice dorește să teleporteze un qubit (particula 1) lui Bob. Alice și Bob partajează o pereche entanglată auxiliară (particulele 2 și 3), cu polarizări ortogonale – canalul cuantic de informație. Alice entanglează particulele 1 și 2, proiectându-le prin efectuarea unei măsurători a stării Bell (BSM) într-una din cele 4 stări posibile. Starea particulei 3 nu este încă identică cu cea inițială a particulei 1. Alice îi transmite lui Bob pe un canal clasic pe care dintre cele 4 stări Bell a obținut-o. Bob efectuează transformarea unitară inversă asupra particulei 3, proiectând-o în starea inițială a particulei 1. (după D. Bouwmeester, ... A. Zeilinger, "Experimental quantum teleportation", Nature 390, 575 (1997).)

Echipa lui Zeilinger a demonstrat, de asemenea, cum își pot transfera starea de entanglement două perechi de fotoni entanglați, astfel încât un foton dintr-o pereche să ajungă entanglat cu un foton din cealaltă. Această tehnică poate fi utilă în conectarea nodurilor dintr-un viitor internet cuantic.

Tehnicile de teleportare dezvoltate în grupul lui Zeilinger și-au dovedit din plin aplicabilitatea și în *criptografia cuantică*. Principial, teleportarea asigură comunicații perfect securizate, deoarece orice încercare de interceptare a informației sau a cheii de criptare distruge fragila stare de entanglement care susține canalul cuantic de comunicare. Aceste tehnici ar putea, de asemenea, permite viitoarelor computere cuantice să transfere informații în mod securizat și eficient.

În 2017, Anton Zeilinger și fostul său doctorand Jian-Wei Pan, în prezent profesor la University of Science and Technology of China, au demonstrat posibilitatea comunicațiilor intercontinentale securizate, utilizând ca și canal de comunicare fotoni entanglați emiși de satelitul chinezesc Micius, și purtând o conversație video criptată de 75 de minute de la peste 1000 km distanță.

În afară de fotoni, entanglementul cuantic a mai fost demonstrat experimental de alte grupuri folosind electroni (2015), neutrini (2016), fullerene  $C_{60}$  (1999), și chiar diamante mici (2011). Fără excepție, rezultatele au indicat că "interacțiunea fantomatică la distanță" este reală și descrierea oferită de mecanica cuantică este corectă.

Contribuțiile conceptuale și experimentale determinante ale celor trei laureați - Alain Aspect, John F. Clauser și Anton Zeilinger - au impulsivat în mod hotărâtor dezvoltarea științei informației cuantice și a calculului cuantic, creând premisele utilizării entanglementului și altor efecte cuantice pe scară largă pentru realizarea unor tehnologii cu performanțe de neatins prin metodologiile clasice.

## Surse bibliografice

The Nobel Committee for Physics, <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2022/summary/>,  
<https://www.nobelprize.org/uploads/2022/10/popular-physicsprize2022.pdf>,  
<https://www.nobelprize.org/uploads/2022/10/advanced-physicsprize2022.pdf>

Nature, <https://www.nature.com/collections/bebedaidae>

Science, [www.science.org/content/article/nobel-prize-physics-2022](http://www.science.org/content/article/nobel-prize-physics-2022)

New Scientist, [www.newscientist.com/article/2340852-nobel-prize-in-physics-awarded-to-pioneers-of-quantum-information/](http://www.newscientist.com/article/2340852-nobel-prize-in-physics-awarded-to-pioneers-of-quantum-information/)

Scientific American, [www.scientificamerican.com/article/explorers-of-quantum-entanglement-win-2022-nobel-prize-in-physics1/](http://www.scientificamerican.com/article/explorers-of-quantum-entanglement-win-2022-nobel-prize-in-physics1/)

Science News, [www.sciencenews.org/article/physics-nobel-prize-2022-quantum-entanglement-tech](http://www.sciencenews.org/article/physics-nobel-prize-2022-quantum-entanglement-tech)

The New York Times, [www.nytimes.com/2022/10/04/science/nobel-prize-physics-winner.html](http://www.nytimes.com/2022/10/04/science/nobel-prize-physics-winner.html)

The Washington Post, <https://www.washingtonpost.com/science/2022/10/04/nobel-prize-physics/>

Wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum\\_entanglement](https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_entanglement)