

PRINCIPIUL NONLOCALISMULUI CUANTIC ȘI INSEPARABILITATEA CUANTICĂ A PARTICULELOR

Vitalie CHISTOL, dr., conf. univ.

<https://orcid.org/0000-0002-4761-5892>

Vasile TRONCIU, dr. hab., prof.

<https://orcid.org/0000-0002-9164-2249>

Departamentul fizică, Universitatea Tehnică a Moldovei

Rezumat. În articol sunt discutate principiul nonlocalismului și inseparabilitatea cuantică a particulelor în raport cu localismul din prisma mai multor fizicieni celebri.

Cuvinte cheie: fizică, nonlocalism cuantic, localism, inseparabilitatea cuantică a particulelor.

THE PRINCIPLE OF QUANTUM NONLOCALISM AND THE QUANTUM INSEPARABILITY OF PARTICLES

Abstract. The article discusses the principle of nonlocalism and the quantum inseparability of particles in relation to localism from the perspective of several famous physicists.

Keywords: physics, quantum nonlocalism, localism, quantum inseparability of particles.

Nonlocalismul, după însăși denumirea sa, neagă localismul. De aceea, pentru a vorbi despre principiul nonlocalismului, trebuie să vedem mai întâi în ce constă principiul localismului.

Principiul localismului presupune că orice acțiune se transmite în spațiu de la un obiect A la un obiect B strict local, parcurgând consecutiv toate punctele spațiului dintre A și B. Obiectele A și B, aflate la distanță unul de altul, nu pot acționa unul asupra altuia, evitând spațiul dintre ele. Dacă vom înconjura obiectul B cu un înveliș impenetrabil pentru câmp, atunci obiectul A nicicum nu va putea acționa asupra obiectului B.

În 1949 Einstein scria [1] că conceptele fizice se referă la lumea exterioară reală, la lucruri care pretind la o „existență reală“, independent de observator și independent unul de celălalt, deoarece ele sunt în diferite părți ale spațiului. Fără această presupunere a existenței reciproc independente a obiectelor distanțate în spațiu, gândirea fizică, într-un anumit sens, ar fi fost imposibilă. De asemenea, este imposibil să ne imaginăm cum ar putea fi formulate și verificate legile fizice fără o astfel de separare clară a obiectelor.

Lumea în care trăim este înzestrată cu toate semnele localismului. Noi avem foarte bine dezvoltat simțul locului și al legăturii dintre locuri. Deseori simțim neputința de a acționa asupra la ceva care se află prea departe de noi. Aproape toate particularitățile esenței noastre fizice sunt spațiale. Ocupăm un loc în spațiu. Avem o formă. Ne mișcăm în spațiu. Orice interacțiune care are loc între noi și restul lumii trece prin spațiu. Fizica a început cu studiul mișcării corpurilor în spațiu, iar spațiul determină aproape toate mărimile fizice: distanța, dimensiunea, forma, poziția, viteza, direcția.

Cu toate acestea, microparticulele se supun unor principii deosebite de cele ale corpurilor din macrolume. Unul dintre acestea este principiul nonlocalismului. Acest principiu neagă localismul și se manifestă, mai ales, în cazul particulelor aflate într-o stare deosebită, care nu are analoge în fizica clasică, numită stare de inseparabilitate cuantică. Sensul inseparabilității cuantice poate fi explicat prin următorul exemplu. Presupunem că două persoane, aflate în două odăi, aruncă câte o monedă. Monedele în mod aleatoriu vor cădea ori cu capul, ori cu pajura în sus și rezultatul căderii unei monede nici cum nu va influența asupra rezultatului căderii altei monede. Acum să ne imaginăm că aceste monede sunt obiecte cuantice care s-au aflat în apropiere una de alta și au interacționat între ele. În acest caz comportamentul particulelor nu mai este independent. Monedele devin legate între ele prin legături nonlocale și ele devin un tot întreg. Rezultatul căderii unei monede va influența într-un anumit mod rezultatul căderii celeilalte monede. De exemplu, dacă o monedă va cădea cu capul în sus, atunci cealaltă neapărat va cădea cu pajura în sus. În acest caz se spune că monedele se află în stare de inseparabilitate cuantică. Comportamentul particulelor inseparabile este coordonat, în ciuda faptului că în spațiu ele nu sunt legate prin careva forțe. Pentru ele nu există loc în spațiu sau distanță. Din cauza absenței unui mecanism de interacțiune, particulele par a fi complet autonome și totuși acțiunea asupra uneia din ele înseamnă totodată și o acțiune momentană asupra celei de-a doua, ca și cum distanța și timpul pentru ele nu ar însemna nimic. Aceste particule se pot afla în diferitele capete ale Universului și totuși ele se vor comporta în unison. Acționând asupra unei particule, acțiunea momentană se va transmite și asupra celei de-a doua. Asemenea particule încalcă principiul localismului. Spațiul pentru ele nu este un obstacol.

Cum se transmite această acțiune? Care este mecanismul interacțiunii dintre particulele aflate la distanțe atât de mari?

Ideea că particulele din capete opuse ale Universului ar putea fi cumva legate între ele, lui Einstein i-a părut o nebunie. El credea că lumea pur și simplu pare nonlocală. În realitate ea este locală și măsurările efectuate într-un loc nu pot influența momentan o particulă aflată departe de acest loc. O astfel de acțiune Einstein a numit-o „acțiune fantomatică la distanță”.

O altă ipoteză fundamentală susținută de către Einstein este recunoașterea existenței „realității obiective”. El susținea că diferite caracteristici ale unei particule (de exemplu, impulsul, poziția ei în spațiu) există obiectiv, chiar dacă particulă este îndepărtată de noi și aceste caracteristici nu sunt direct observabile. În opinia lui Bohr, însă, astfel de caracteristici nu pot fi atribuite unei particule dacă nu există nici o posibilitate reală de observare a acestora. Bohr susținea că până la măsurare particulele inseparabile nu posedă aceste caracteristici și numai în urma măsurătorilor noi le impunem lor caracteristicile respective. Astfel, Bohr neagă existența „realității obiective” și, prin aceasta susține că între particulele inseparabile există legături nonlocale.

Pe timpul lui Einstein nu existau posibilități de a verifica concepțiile lui Bohr. Însă, în anul 1964 John Stewart Bell formulează și demonstrează teorema care acum este numită

teorema lui Bell, sau inegalitatea lui Bell, cu ajutorul căreia s-a putut verifica existența legăturilor nonlocale la particulele inseparabile. Există mai multe formulări ale inegalității lui Bell. Una din ele este următoarea: *Pentru un grup de obiecte care au proprietățile A, B și C, suma numărului obiectelor care au proprietatea A, dar nu au proprietatea B și a numărului obiectelor care au proprietatea B, dar nu au proprietatea C, este mai mare sau egală cu numărul obiectelor care au proprietatea A, dar nu au proprietatea C. Această inegalitate poate fi scrisă astfel:*

$$N(A, \text{non } B) + N(B, \text{non } C) \geq N(A, \text{non } C).$$

Inegalitatea lui Bell se respectă pentru oricare grup de obiecte care au stabilite proprietățile A, B și C. În anul 1982 Alain Aspect și colaboratorii săi de la Institutul de Optică Teoretică și Aplicată din Paris pentru prima dată demonstrează încălcarea inegalității lui Bell pentru particulele inseparabile [2]. Rezultatele obținute de Aspect și colaboratorii săi confirmă faptul că particulele inseparabile nu au proprietăți stabilite până la măsurare și că între ele există legături nonlocale. În anul 1910 fizicienii de la Institutul de Optică Cuantică și Informație Cuantică din Austria au demonstrat menținerea legăturilor nonlocale la fotonii aflați la distanța de 144 km unul de altul [3]. Prezența legăturilor nonlocale la particulele inseparabile a fost confirmată printr-o mulțime de alte experimente. Despre importanța problemei nonlocalismului și a inseparabilității cuantice ne vorbește și faptul că pentru studierea acestor probleme au fost decernate două premii Nobel: în anul 2012 premiul Nobel pentru fizică a fost decernat fizicienilor Serge Haroche și David J. Wineland care experimental au studiat particulele cuantice inseparabile în scopul creării calculatoarelor cuantice și a ceasurilor optice, iar în anul 2022 fizicienii Alain Aspect, John F. Clauser și Anton Zeilinger au primit premiul Nobel „pentru experimente cu fotoni inseparabili, stabilirea încălcării inegalităților lui Bell și pionieratul în domeniul științei informației cuantice”.

Între concepțiile localistă și cea nonlocalistă s-a dus o luptă permanentă, începând încă cu filosofii din Grecia antică. Ei au încercat să descrie Universul ca un gigantic joc de biliard. Atomii - elementele de bază ale lumii – ca niște bile de biliard, zboară peste tot, se ciocnesc între ei și transmit interacțiunile dintre corpuri. Aceste interacțiuni sunt strict locale, deoarece ele se transmit de la atom la atom, iar până la ciocnire „bilele” nu interacționează între ele. Timp de aproape două milenii mecanismul interacțiunilor dintre corpuri s-a modificat în detalii, însă principiile sale de bază au rămas aceleași. În special, principiul localismului.

Newton a renunțat la fizica din acea vreme și a explicat gravitația printr-un proces nonlocal. El pentru prima dată a afirmat că forțele de gravitație acționează între toate corpurile din Univers și aceste forțe se transmit de la un corp la altul instantaneu. Anume în aceasta și constă nonlocalismul gravitației lui Newton. Pentru a explica cum anume se transmite acțiunea de la un corp la altul, Newton a considerat că intermediarul nematerial capabil să transmită gravitația, este spațiul.

Gravitația lui Newton a fost recunoscută cu greu de oamenii de știință, dar treptat ea a devenit un concept general acceptat. Însă așa se întâmplă că noțiunile „general acceptate”

câteodată pot să se schimbe. Până la Newton general acceptate se considerau acțiunile prin contact direct. După el general acceptate au devenit acțiunile nonlocale.

Nonlocalismul rămâne „general acceptat” până la mijlocul secolului 19, când în anul 1845 Faraday introduce noțiunea de câmp pentru a explica fenomenele electrice și magnetice. Câmpul este local din două puncte de vedere. În primul rând el înconjoară toate corpurile, pătrunde în interiorul lor și acționează asupra lor. În al doilea rând el are nevoie de timp pentru ca să transmită acțiunea de la un corp la altul. Astfel, se revine la localism și principiul localismului din nou devine „general acceptat”.

Odată cu dezvoltarea fizicii cuantice problema nonlocalismului iarăși apare la suprafață. Vom prezenta două exemple care, după părerea lui Einstein, ne demonstrează că mecanica cuantică sau nu este completă, sau este nonlocală.

Primul exemplu a fost propus de însăși Einstein și este cunoscut sub numele de „paradoxul balonului”. Conform principiilor mecanicii cuantice lumina este în același timp și particulă și undă. Să presupunem că o sursă de lumină emite un foton. Fotonul se propagă sub formă de undă ca un balon de cauciuc care mereu se umflă. Energia undei este repartizată pe întreaga suprafață a balonului. La un moment dat unda ajunge la un atom care poate fi la o distanță destul de mare de la sursă. Balonul se sparge, întreaga energie a undei se concentrează într-un singur loc și atomul absoarbe fotonul. De unde știu diferite regiuni ale undei că ele mai departe nu trebuie să se propage? Cum s-a concentrat energia undei într-un singur punct și în cât timp a decurs această concentrare a energiei? Explicația poate fi numai print-un proces misterios și nonlocal. După cum s-a exprimat și Bohr, în inima atomului se întâmplă ceva suspect, ceva ce „reprezintă o dificultate pentru descrierea obișnuită spațial-temporală a naturii”.

Al doilea exemplu ține de ecuația lui *Schrödinger*, care este ecuația de bază a mecanicii cuantice și care descrie funcția de undă a unei particule. Această funcție este nonlocală, deoarece printr-o singură funcție de undă poate fi descrisă soarta unui grup de mai multe particule, indiferent cât de departe se află ele una de alta.

Principiul nonlocalismului cuantic se deosebește radical de nonlocalismul gravitației lui Newton, deoarece aceasta din urmă slăbește atunci când ne îndepărtăm de obiectul care ne atrage și, prin aceasta, totuși, manifestă calități spațiale. Nonlocalismul cuantic nu manifestă proprietăți spațiale, el pune la îndoială însăși noțiunea de spațiu. El ne vorbește despre faptul că noi trăim într-un Univers holistic, care nu poate fi redus la unele părți spațiale ale sale. Universul posedă niște proprietăți care sunt ascunse de noi atunci când îl privim în parte și care se dezvăluie atunci când îl privim ca ceva întreg. Legătura dintre particulele inseparabile are loc, probabil, în afara spațiului și noi greșim atunci când considerăm că ele sunt diferite și ocupă diferite regiuni ale spațiului.

În fizica cuantică sunt utilizate noțiunile „particulă cuantică” și „câmp cuantic”, care înseamnă „ceva asemănător cu particula” și „ceva asemănător cu câmpul”. Să luăm ca exemplu particula. Noi nu putem să determinăm exact nici poziția, nici viteza ei. Mai mult ca

atât: aceeași particulă poate să se afle simultan în două locuri diferite. Atunci, ce fel de particulă este ea? Același lucru poate fi spus și despre câmpul cuantic. Rezultă că particula și câmpul în înțelesul obișnuit al cuvântului nu există. Nu există nimic care poate fi legat de un anumit loc al spațiului. Însă, fizicienii și filozofii au dedus întotdeauna natura spațiului din comportamentul materiei. Vechii atomiști greci au venit cu conceptul de spațiu pentru a da particulelor un loc de existență. Pentru teoreticienii moderni, spațiul este un substrat alcătuit din câmpuri. Dar, dacă particulele și câmpurile nu există, atunci spațiul își pierde semnificația.

Practic toți fizicienii și filozofii, încă de pe timpul lui Democrit, considerau că spațiul este cel mai înalt nivel al realității fizice. Dar dacă aceasta nu este așa? Poate nonlocalismul reprezintă un nivel al realității fizice mai înalt decât spațiul? La acest nivel al realității fizice noțiunea de distanță nu mai este aplicabilă, iar obiectele care se află la o distanță mare în spațiu, în realitate ocupă același loc, sau poate chiar reprezintă același obiect, care se manifestă în diferite locuri ale spațiului. Fizicianul și filosoful Michał Heller spune [4]: „Dacă acceptăm că nivelul fundamental al fizicii este nonlocal, atunci totul devine evident, deoarece două particule, care sunt departe una de alta, se află la același nivel fundamental nonlocal. Pentru ele timpul și spațiul nu contează”. Numai când încercăm să legăm aceste fenomene de spațiu (deoarece ne vine greu să judecăm altfel), ele nu mai pot fi înțelese.

Fizicianul-teoretician *Nima Arkani-Hamed* spune [4] că „spațiu-timpul nu este neapărat fundamental. El trebuie să fie alcătuit din ceva mai elementar”.

Este adevărat că practic toate teoriile fizice sunt bazate pe noțiuni spațiale, iar spațiul are rolul unu lipici care menține ordinea în Univers. Însă este posibilă și o altă variantă: Universul este ordonat de la sine, iar spațiul este doar o noțiune potrivită pentru a descrie această ordine.

Acest articol a fost dezvoltat în cadrul Proiectului PS nr: 20.80009.5007.08.

Bibliografie

1. EINSTEIN, A. Quantenmechanik und Wirklichkeit. In: *Dialectica*, V2, nr. 3-4, 1948. p.320-324.
2. ASPECT, A.; DALIBARD, J.; ROGER, G. Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers. In: *Phys. Rev. Lett.* V. 49, nr. 5, 1982, p. 1804-1807.
3. SCHEIDL, T. Violation of local realism with freedom of choice. In: *Proceeding of the National Academy of Sciences of the USA*, vol. 107 no. 46, p.19708–19713. 2010.
4. MUSSER, J. Spooky Action at a Distance: The Phenomenon That Reimagines Space and Time and What It Means for Black Holes, the Big Bang, and Theories of Everything. Farrar, Straus and Giroux, New York, 2015.