

RECONSTRUCȚIA MECANICII CUANTICE DIN PRINCIPII FIZICE: METODĂ ȘI INTERPRETARE

Dr. Florin MOLDOVEANU¹
fmoldove@gmail.com

ABSTRACT:

Quantum mechanics is a successful theory of nature which passed every experimental test. Its mathematical formalism is abstract and not based on physical principles unlike the special theory of relativity. The principle of relativity can be formulated as the invariance of the laws of nature under linear coordinate systems. Similarly, quantum mechanics can be derived from two physical principles: the invariance of the laws of nature under time evolution and the invariance of the laws of nature under system composition. The counterintuitive features of quantum mechanics as well as its major interpretations are critically analyzed. The interpretation problem of quantum mechanics is a pseudo-problem because quantum mechanics is an irreducible theory which does not admit explanations based on our classical intuition. The real problem is that of explanation of the emergence of classical behavior at the macroscopic level given a quantum foundation.

KEYWORDS: Quantum mechanics reconstruction, quantum behaviors, quantum interpretations.

1. De ce este mecanica cuantică neintuitivă?

Până în 1900 mecanica clasică a trecut cu succes toate testele experimentale însă, pentru a explica radiația corpului negru, Planck a introdus un principiu fundamental diferit: energia se emite și se absoarbe în cantități discrete. Descoperirea lui Planck a deschis drumul unei schimbări profunde în modul de a descrie natura, care a necesitat 30 de ani în a definitiva formalismul a ceea ce astăzi numim mecanica cuantică. Formalismul mecanicii cuantice este complet diferit de cel al mecanicii Newtoniene: un sistem fizic este descris de așa-zisa funcție de undă care există într-un spațiu abstract numit spațiu Hilbert. Proprietățile fizice uzuale: poziție, impuls, moment cinetic, etc. sunt reprezentate de operatori care acționează asupra funcției de undă. Pentru un operator, funcțiile de undă care rămân neschimbate până la un factor multiplicativ de scală se numesc *eigenfunctions*, iar scala se numește *eigenvalue*. Valorile

¹ Committee for Philosophy and the Sciences, University of Maryland, College Park, MD 20742.

măsurătorilor sunt date de eigenvalues, dar mecanica cuantică nu prezice care valoare va fi obținută pentru un experiment anume. Mecanica cuantică este o teorie probabilistă, și nu deterministă precum mecanica clasică. Dar este caracterul aleatoriu al predicțiilor mecanicii cuantice unul intrinsec, sau noi suntem de vină pentru că perturbăm sistemele microscopice pe care le măsurăm?

Dacă motivul caracterului aleatoriu este că noi ne comportăm în lumea microscopică precum un elefant într-un magazin de porțelanuri, atunci mecanica cuantică este un mod miop de a înțelege lucrurile și înseamnă că există „variabile ascunse” inaccesibile experimental. Existența lor implică faptul că mecanica cuantică este o teorie incompletă, iar în 1935 Einstein, Podolsky și Rosen (EPR) au propus un argument care, în opinia lor, ar demonstra acest lucru².

1.1 Argumentul EPR

Einstein, Podolsky și Rosen au propus următorul experiment: un sistem compus din două particule, inițial staționar, se dezintegrează în cele două particule componente. Măsurăm poziția particulei din stânga și impulsul particulei din dreapta. Din conservarea impulsului știm că măsurarea impulsului particulei din dreapta determină complet impulsul particulei din stânga. Iată deci că am putut să măsurăm simultan atât poziția cât și impulsul particulei din stânga, aparent violând relațiile de incertitudine Heisenberg. Problema nu este însă violarea relației de incertitudine, întrucât măsurarea poziției distruge valoarea impulsului, ci faptul că mecanica cuantică spune că măsurătoarea poziției face imposibilă definirea impulsului.

Să presupunem că măsurăm impulsul particulei din dreapta după ce am măsurat poziția particulei din stânga iar cele două laboratoare sunt suficient de îndepărtate ca să nu poată să comunice imediat. Până când un semnal se poate propaga cu viteza luminii din laboratorul din dreapta la cel din stânga, mecanica cuantică arată că impulsul particulei din stânga este nedefinit. Totuși experimentalistul din laboratorul din dreapta poate prezice cu certitudine valoarea impulsului particulei din stânga. Cum în opinia EPR o măsurătoare în laboratorul din dreapta nu poate afecta starea de fapt în laboratorul din stânga, aceasta implică faptul că impulsul particulei din

² Einstein, A.; Podolsky, B.; Rosen, N. „Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?”, *Physical Review*, 47 (10), 1935, pp. 777-780.

stânga există independent de măsurătoare. Deoarece acest lucru contrazice mecanica cuantică, atunci implicit mecanica cuantică este incompletă.

Argumentul EPR a rămas valabil până în 1964, când John Bell a arătat că o măsurătoare în laboratorul din dreapta schimbă instantaneu starea de fapt în laboratorul din stânga chiar când cele două laboratoare sunt separate și incapabile să comunice în mod direct³. Însă chiar dacă afectează instantaneu sistemul din stânga, un experimentalist în laboratorul din dreapta nu poate să transmită mesaje mai repede decât viteza luminii deoarece rezultatul măsurătorii în laboratorul din stânga este aleatoriu. Înainte să prezentăm argumentul lui Bell, vom discuta însă un alt argument celebru - argumentul Kochen-Specker din 1967, care arată că valoarea unui experiment nu există independent de măsurătoare⁴.

1.2 Contextualitatea mecanicii cuantice

Argumentul Kochen-Specker folosește proprietățile particulelor de spin 1. Dacă măsurăm valoarea pătrată a spinului pe oricare trei direcții perpendiculare, vom obține cu certitudine două valori de 1 și o valoare de 0. Acesta este atât o predicție a formalismului matematic al mecanicii cuantice, cât și un rezultat experimental. Nu știm pe care direcții măsurătorile vor rezulta în valorile de zero și unu, dar întrebarea pe care și-au pus-o Kochen și Specker a fost dacă putem întotdeauna da valorile 0 și 1 înainte de măsurătoare? Pentru trei direcții perpendiculare nu este nici o problemă, dar ce se întâmplă dacă avem mai multe direcții? Inițial Kochen și Specker au găsit un set particular de multe direcții pentru care acest lucru nu se poate face. O simplificare pedagogică cu doar 33 de direcții a fost găsită de Asher Peres folosind cercuri maximale înscrise pe fețele unui cub. Problema se reduce la o problemă de colorare: vrem să colorăm cu albastru valorile de zero și cu roșu valorile de unu. Dacă alegem un set arbitrar de trei direcții perpendiculare și colorăm cu albastru locul unde una dintre cele trei direcții intersectează cubul și cu roșu locul unde celelalte două direcții perpendiculare intersectează cubul, ne întrebăm: putem să colorăm în mod consistent toate cele 33 de direcții? Răspunsul este negativ, indiferent de unde începem procesul de colorare. Ceea ce arată această imposibilitate de a

³ Bell, J. S., *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics*, Cambridge University Press, 1988.

⁴ Kochen, S. and Specker E. P. „The problem of hidden variables in quantum mechanics”, *Journal of Mathematics and Mechanics*, 17, 1967, pp. 59-87.

da valori în mod consistent tuturor direcțiilor de măsurare este că rezultatele măsurătorilor sunt „contextuale”, adică depind nu doar de sistemul fizic pe care vrem să îl măsurăm ci și de configurația aparatului de măsură.

Rezultatul unei măsurători nu există deci independent de actul de măsurătoare, așa cum se întâmplă în cazul mecanicii clasice. În mecanica Newtoniană măsurătoarea descoperă proprietățile ce există în mod obiectiv (poziție, impuls, etc.), dar mecanica cuantică nu respectă așa-zisul „realism local”. Acest lucru a fost demonstrat într-un mod robust de John Bell care a investigat corelații statistice între două măsurători.

1.3 Corelații în teoriile ce respectă realismul local

Argumentul EPR de incompletitudine a fost inițial combătut de Niels Bohr care a subliniat importanța contextualității experimentului în mecanica cuantică. Deși contra-argumentul nu este decisiv, comunitatea fizicienilor l-a acceptat și subiectul a fost ignorat până când John Bell a demonstrat incompatibilitatea cu mecanica cuantică a oricărei teorii care respectă principiile realismului local folosit de Einstein, Podolsky și Rosen.

În mecanica cuantică, funcțiile de undă care descriu starea unui sistem se pot aduna și înmulți cu scalari iar acest lucru se numește superpoziție. Fizic aceasta înseamnă că un sistem cuantic poate să existe „între” valorile ce se obțin experimental. De exemplu Erwin Schrödinger a introdus un experiment mental celebru în care o pisica este cincizeci la sută vie și cincizeci la sută moartă. Pentru obiecte macroscopice, precum celebra pisică, superpoziția nu există, dar în lumea microscopică efectul este cât se poate de real și el produce efecte măsurabile experimentale.

John Bell a observat că dacă un sistem compus precum cel folosit de EPR se dezintegrează, din cauza ambiguității date de superpoziție, corelația între rezultatelor obținute în cele două laboratoare este mai mare decât prezice mecanica clasică. Esențial în calculul lui Bell este ipoteza EPR că o măsurătoare în laboratorul din dreapta nu poate afecta starea de fapt în laboratorul din stânga. Existența superpoziției este incompatibilă cu independența celor două măsurători chiar când cele două laboratoare nu pot să comunice pentru că sunt foarte îndepărtate unul de celălalt, spre exemplu ele se află în două galaxii diferite. Pentru că Bell a obținut o inegalitate de corelații ce este violată de mecanica cuantică, ea a putut fi testată

experimental iar primul experiment ce a confirmat analiza lui Bell a fost efectuat în 1981 de către Alain Aspect⁵.

1.4 Mecanica cuantică contrazice intuiția clasică

Acum putem să colectăm ideile prezentate mai sus și să arătăm în ce fel mecanica cuantică contrazice experiența noastră ca obiecte macroscopice.

În primul rând, mecanica cuantică prezice doar *probabilități*. Acesta înseamnă că nu știm care va fi rezultatul unui experiment înainte să măsurăm efectiv. Caracterul aleatoriu al experimentelor este un fenomen intrinsec. În al doilea rând, rezultatul unei măsurători nu există înainte de măsurare. Einstein a avut o replică celebră la aceasta proprietate a mecanicii cuantice: „Luna există pe cer chiar dacă nu mă uit la ea”, dar Luna este un obiect macroscopic care nu respectă principiul de superpoziție. Ultima proprietate neintuitivă majoră este că la nivel atomic corelațiile între rezultatele măsurătorilor sunt mai mari decât ne dă voie un principiu de realism local.

2. Interpretările mecanicii cuantice

De la descoperirea ei, mecanica cuantică a trecut cu succes toate testele experimentale și nimeni nu pune la îndoială validitatea ei. Natura este la origine cuantică. Însă până în prezent nu există un consens despre cum trebuie să înțelegem comportamentul ciudat al naturii. Toate interpretările mecanicii cuantice propuse până acum au atât părți intuitive cât și comportamente bizare. Deși ele sunt bine cunoscute, de obicei părțile discutabile ale interpretărilor nu sunt prezentate în mod critic de susținătorii lor, care preferă să pună accent pe virtuți. În cele ce urmează interpretările majore ale mecanicii cuantice vor fi introduse prin prisma „defectelor” lor.

2.1 Interpretarea tranzacțională

Dacă credem în semnale primite din viitor, dar totuși nu putem să le folosim să extragem informații utile, de exemplu numerele câștigătoare la loterie, atunci avem la dispoziție interpretarea tranzacțională. În această interpretare funcția de undă a sistemului cuantic care trebuie măsurat se propagă în mod normal din trecut în prezent, iar funcția de undă a aparatului

⁵ Aspect, A.; Grangier, P.; Roger G. „Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell’s Inequalities”, *Physical Review Letters*, 49 (2), 1982, pp. 91-94.

de măsură se propagă din viitor în prezent. Când cele două funcții de undă se întâlnesc și are loc așa-zisa tranzație atunci avem un rezultat al măsurătorii.

2.2 Interpretarea de Broglie-Bohm

Dacă credem că există viteze mai mari decât viteza luminii, dar totuși nu putem să ne deplasăm mai repede ca ea, atunci putem să acceptăm interpretarea de Broglie-Bohm. Particulele elementare au o poziție bine definită în interpretarea Bohm. Diferența între mecanica clasică și interpretarea de Broglie-Bohm este existența așa-zisului „potențial cuantic” care ghidează particula în mișcarea ei. În experimentul EPR, potențialul cuantic se modifică instantaneu când un experimentalist realizează o măsurătoare. Modificarea se propagă mai repede decât viteza luminii pentru a ghida cealaltă particulă și a realiza corelațiile cuantice.

2.3 Interpretarea lumilor paralele

Dacă credem că există nemurire și că orice potențialitate se realizează într-un univers paralel, dar nu observăm acest lucru în mod practic, atunci putem să folosim interpretarea lumilor paralele. În această interpretare, de fiecare dată când are loc o măsurătoare, universul se împarte în lumi paralele distincte pentru fiecare rezultat aleatoriu posibil. Deoarece toate potențialitățile se realizează în această interpretare, noțiunea de probabilitate nu are sens și din acest motiv nimeni nu a reușit să demonstreze într-un mod necircular o proprietate esențială a mecanicii cuantice: regula Born. Regula lui Born leagă teoria de experiment și dă corespondența între sistemul cuantic și distribuția statistică a rezultatului măsurătorii. Fără derivarea regulii Born interpretarea lumilor paralele este o teorie incompletă ce nu trebuie luată în serios.

2.4 Interpretarea Copenhaga

Această interpretare este acceptată (în mod necritic) de majoritatea fizicienilor, dar ea este de fapt o familie de interpretări distincte. Problema acestei familii de interpretări este acceptarea mecanicii clasice ca bază de descriere a aparatului de măsură. În această interpretare folosim o teorie incorectă a naturii (mecanica clasică) ca să definim teoria corectă: mecanica cuantică.

3. Principiile mecanicii cuantice

Mecanica cuantică are mai multe formulări: standard, în spațiul fazelor, în formalismul integralei de drum, etc. În cele ce urmează vom introduce axiomele standard. Apoi vom arăta cum poate fi derivată mecanica cuantică din principii fizice.

3.1 Axiomele mecanicii cuantice

În primul rând în mecanica cuantică starea unui sistem fizic este reprezentată de un vector într-un spațiu Hilbert. Mărimile fizice pe care putem să le măsurăm sunt reprezentate de operatori auto-adjuncți în spațiul Hilbert. Valoarea medie a unei mărimi fizice A al unui sistem fizic $|\psi\rangle$ este dată de produsul interior: $\langle\psi|A|\psi\rangle$. Valorile rezultatului măsurătorii sunt date de așa-zisele eigenvalue λ : $A|\psi\rangle = \lambda|\psi\rangle$. Evoluția temporală a sistemului cuantic respectă ecuația Schrödinger.

Ceea ce observăm este caracterul abstract al axiomelor, însă nu acesta este motivul pentru care mecanica cuantică este neintuitivă. Teoria relativității speciale conține fenomene neintuitive precum: contracția lungimilor, dilatarea temporală, inexistența simultaneității absolute, sau paradoxul gemenilor. La nivel axiomatic, teoria relativității speciale se bazează pe transformarea Lorentz, însă ea se deduce dintr-un principiu fizic: invarianța la transformări lineare de coordonate. Dacă înțelegem principiul fizic, restul teoriei relativității speciale se deduce ca o consecință matematică. Putem să reconstruim formalismul matematic al mecanicii cuantice pornind de la principii fizice?

3.2 Principiile fizice ale mecanicii cuantice

Se poate arăta ca axiomele mecanicii cuantice sunt consecința a două principii fizice⁶:

- Invarianța legilor naturii la evoluția temporală,
- Invarianța legilor naturii la compoziție.

Aceste principii sunt ușor de înțeles. În mod clar, legile naturii sunt stabile și ele sunt la fel astăzi ca și în trecut sau în viitor. Aceasta este semnificația invarianței legilor naturii în raport cu evoluția temporală. Dar cum putem să înțelegem invarianța legilor naturii la compoziție?

⁶ Moldoveanu, F. „Quantum mechanics from invariance principles”, *Journal of Physics*, 626, 2015 012067.

În primul rând, ce înseamnă compoziție? Prin compoziție înțelegem combinarea a două sau mai multe sisteme fizice într-un sistem compus. Spre exemplu, sistemul solar este un sistem compus. Invarianța la compoziție se poate justifica în trei moduri:

- Dinamica nu se schimbă prin adăugarea unor noi grade de libertate,
- Nu există „insule de natură” cu legi fizice distincte,
- Constanta lui Planck nu depinde de dimensiunea spațiului Hilbert.

În mod general, invarianța la compoziție înseamnă că dacă sistemul **A** este descris de o teorie *T*, sistemul **B** este descris de aceeași teorie *T*, atunci și sistemul compus **A+B** este și el la rândul lui descris de aceeași teorie *T*.

3.3 Reconstrucția mecanicii cuantice din principii fizice

Compoziția a două sisteme fizice impune constrângeri severe asupra structurilor matematice ce pot descrie natura. De exemplu două cercuri nu se pot combina pentru a forma un alt cerc. Se poate arăta ca există doar trei soluții posibile ce respectă invarianța la compoziție împreună cu invarianța legilor naturii la translații temporale:

- Mecanica cuantică (corespunzătoare compoziției parabolice)
- Mecanica clasică (corespunzătoare compoziției eliptice)
- Mecanica cuantică hiperbolică (corespunzătoare compoziției

hiperbolice)

Cazul hiperbolic este nefizic deoarece el prezice probabilități negative. Natura poate respecta doar mecanica cuantică sau mecanica clasică, iar distincția dintre cele două cazuri se face apelând la experiment.

4. Interpretarea mecanicii cuantice

Ca obiecte macroscopice, selecția naturală în biologie a favorizat dezvoltarea unei intuiții clasice și nu a unei intuiții cuantice. Întrebarea este dacă trebuie să explicăm mecanica cuantică în termenii mecanicii clasice. Dar, deoarece mecanica cuantică este o teorie fundamentală ireductibilă, ea nu admite explicații date de teorii secundare și problema este pusă în mod greșit. Problema esențială nu este explicarea mecanicii cuantice, ci explicarea emergenței fizicii clasice din mecanica cuantică. Această problemă este o problemă deschisă: deși există diferite soluții propuse, momentan nu există consens asupra validității soluțiilor.

Tot așa cum teoria specială a relativității nu necesită explicații dinamice ci cinematice care provin din principiul relativității, nici mecanica

cuantică nu necesită explicații clasice. Axiomele mecanicii cuantice: spații Hilbert, operatori auto-adjuncți etc. sunt consecințe matematice ale principiilor fizice enunțate anterior.

References

- [1] Aspect, A.; Grangier, P.; Roger G. „Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell’s Inequalities”, *Physical Review Letters*, 49 (2), 1982, pp. 91-94.
- [2] Bell, J. S., *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, Cambridge University Press, 1988.
- [3] Einstein, A.; Podolsky, B.; Rosen, N. „Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?”, *Physical Review*, 47 (10), 1935, pp. 777-780.
- [4] Kochen, S. and Specker E. P. „The problem of hidden variables in quantum mechanics”, *Journal of Mathematics and Mechanics*, 17, 1967, pp. 59-87.
- [5] Moldoveanu, F., „Quantum mechanics from invariance principles”, *Journal of Physics*, 626, 2015 012067.