

LIBRIS

We know
books

MIRCEA FLONTA

FILOZOFIA CERCETĂTORULUI

Înțelegerea fizicii cuantelor
la NIELS BOHR și WERNER HEISENBERG



HUMANITAS
BUCUREȘTI

Cuvânt înainte	7
Introducere: Ce este înțelegerea unei teorii fizice?	15

PARTEA ÎNTÂI

1. Considerații preliminare cu privire la înțelegerea fizicii cuantelor	39
2. A existat Școala de la Copenhaga? Contestarea și temeiurile ei	57
3. Prima replică. Oportunitatea regândirii reprezentărilor consacrate asupra cerințelor descrierii științifice a naturii	78
4. A doua replică. Inadecvarea și caracterul indispensabil al conceptelor clasice	100
5. A treia replică. Cum stau lucrurile dacă acceptăm o interpretare radicală a poziției lui Bohr?	127
6. Ce fel de filozofie este filozofia Școlii de la Copenhaga?	144

PARTEA A DOUA

Preambul	177
1. Personalitatea lui Bohr	187
2. Cum a ajuns Bohr la ideea complementarității?	211
3. Cum a evoluat gândirea lui Bohr în înțelegerea fizicii cuantelor?	229

4. Personalitatea lui Heisenberg	247
5. Elaborarea mecanicii cuantice și confruntarea cu Schrödinger	277
6. Dialogul cu Bohr și geneza interpretării de la Copenhaga a mecanicii cuantice	298
7. Filozofii sunt invitați la discuție	323
8. Locul conceptului <i>teorie închisă</i> în înțelegerea fizicii cuantelor	343
9. Filozofia cuantelor în scrierile târzii ale lui Heisenberg	365
Încheiere	385

Considerații preliminare cu privire la înțelegerea fizicii cuantelor

Mulți cercetători ai naturii împărtășesc părerea că fizica cuantelor a adus cu sine cea mai profundă schimbare în fundamentele fizicii moderne de la apariția ei, în secolul al XVII-lea. E vorba de o prefacere ce se exprimă în reconsiderarea întrebărilor care pot fi formulate în mod rezonabil de către cercetători, în regândirea conceptului descrierii teoretice în fizică.

Încă înainte de elaborarea noii mecanici, unii oameni de știință deveniseră conștienți că dezvoltarea fizicii cuantelor ar putea conduce la revizuirea unor reprezentări adânc înrădăcinate cu privire la cerințele descrierii în știința matematică a naturii. După primul Congres Solvay (Bruxelles, 1911), Henri Poincaré a scris un comentariu cu titlul „Sur la théorie des Quanta”¹, referindu-se la datele experimentale cu privire la variația discontinuă a energiei radiației. Acest comentariu va fi reluat într-un articol care a apărut postum:

Nu se mai pune doar întrebarea dacă ecuațiile diferențiale ale dinamicii trebuie să fie modificate, ci dacă legile mișcării ar putea fi încă exprimate prin ecuații diferențiale. Aceasta ar fi revoluția cea mai profundă pe care a suferit-o filozofia naturală de la Newton încoace [...]. Se pune întrebarea dacă nu trebuie să introducem în legile naturale discontinuități nu aparente, ci esențiale, și trebuie să

1. *Journal de Physique théorique et appliquée*, vol. 2, nr. 1 (1912), pp. 5-34.

explicăm, mai întâi, cum s-a putut ajunge la o viziune atât de neobișnuită.¹

Nu este așadar de mirare că niciodată în istoria de până atunci a fizicii moderne întrebarea cum poate și cum trebuie înțeleasă o nouă teorie nu s-a pus cu atâta acuitate și nu a prilejuit atâtea controverse ca în cazul noii mecanici cuantice. Și aceasta deoarece noua teorie nu satisfăcea anumite cerințe despre care s-a putut crede, mult timp, că reprezintă condiții *sine qua non* ale oricărei descrieri satisfăcătoare a fenomenelor naturii. Sunt cerințe pe care le satisfac teoriile fizice numite „clasice”. Se poate spune că o conștiință mai clară a acestor cerințe a fost dobândită abia atunci când a fost elaborată o teorie fizică ce părea să le încalce în mod sistematic. Iată de ce niciodată până atunci, în istoria fizicii moderne, nevoia înțelegerii nu a fost resimțită cu atâta acuitate.

Una dintre caracteristicile descrierilor fizice numite „clasice” este aceea că măsurătorile fac posibilă precizarea simultană a caracteristicilor de stare ale unui sistem, în particular a poziției spațiale și a impulsului, într-un anumit moment al timpului, și, pe această bază, predicția caracteristicilor sale în alte momente ale timpului. Multă vreme s-a considerat de la sine înțeles că acestea sunt cerințe ale unei descrieri obiective a stării și evoluției în timp a oricărui sistem fizic în genere. Descrierea trebuie să satisfacă exigențele principiului determinismului și continuității spațio-temporale. O asemenea descriere poate fi formulată, cel puțin în principiu, fără referire la probabilități.² Introducerea și utilizarea probabilităților în descrierea fizică era atribuită unei cunoașteri imperfecte a caracteristicilor de stare ale sistemelor. Ideea că o descriere

1. „Ipoteza cuantelor”, în H. Poincaré, *Valoarea științei. Ultimele gânduri*, pp. 271–272.

2. Vezi C.Fr. von Weizsäcker, *Aufbau der Physik*, îndeosebi pp. 289–291. „O fizică este numită clasică dacă, din punct de vedere principal, poate fi formulată renunțându-se la conceptul de probabilitate.”

probabilistă a stării sistemului ar fi ireductibilă era respinsă drept inacceptabilă.

Aceasta a fost poziția pe care un cercetător de talia lui Albert Einstein a exprimat-o de multe ori în scrierile și în corespondența lui din ultimii treizeci de ani ai vieții. Deja în 1924, Einstein îi scria prietenului din tinerețe Michele Besso, cu referire la încercările sale de „a armoniza cuantele cu câmpul lui Maxwell“, adică cu cerințele clasice ale descrierii fizice: „Partea matematică este foarte grea, raportul cu experiența devine, din păcate, tot mai indirect. Dar este totuși o *posibilitate* logică de a satisface realitatea fără *sacrificium intellectus*“¹. Este o exprimare categorică a ideii că, în lipsa unei descrieri cauzale a evoluției sistemelor individuale în spațiu și timp, nu se poate vorbi de o descriere fizică cât de cât satisfăcătoare.

O formă mai elaborată a poziției lui Einstein a fost socotită cea formulată într-un foarte cunoscut și mult discutat articol, care a rezultat din discuțiile sale cu fizicienii Boris Podolsky și Nathan Rosen, articol publicat, în anul 1935, în *Physical Review*. La începutul acestui text se spune:

O teorie fizică poate fi considerată satisfăcătoare doar dacă ea îndeplinește două condiții: condiția corectitudinii și condiția completitudinii. O teorie fizică este „corectă“ dacă consecințele ce pot fi derivate din ea sunt în acord cu datele observației și experimentului. Teoria este „completă“ dacă orice element al realității fizice își are corespondentul în teorie. Iar dacă, fără a perturba în vreun fel un sistem, putem prezice cu siguranță valoarea unei mărimi fizice, atunci se poate afirma că există un element al realității fizice care corespunde acestei mărimi.

Concluzia articolului este că noua mecanică cuantică satisface prima condiție, dar nu și pe cea de-a doua. Prin urmare ea este „corectă“, dar nu și „completă“. Funcția de undă din

1. Albert Einstein, *Correspondance avec Michele Besso 1903-1955*, Hermann, Paris, 1972, p. 117.

mecanica cuantică nu oferă o descriere completă a realității fizice. Prin urmare, în formularea ei curentă, mecanica cuantică nu poate fi apreciată drept o teorie fizică pe deplin satisfăcătoare.¹

În diferite formulări, Einstein va relua această apreciere în toate referirile sale ulterioare la mecanica cuantică. Astfel, într-un articol intitulat în mod semnificativ „Fundamentele fizicii teoretice”, el sublinia că mecanica cuantică nu oferă o reprezentare matematică a ceea ce există sau a ceea ce se petrece în spațiu și timp. Ea diferă în mod fundamental de toate teoriile fizice anterioare, atât de cele ale mecanicii particulelor, cât și de cele ale câmpului, deoarece în locul unei descrieri a evenimentelor ea oferă doar „desfășurarea în timp a distribuțiilor probabiliste pentru măsurători posibile”. Einstein refuza să se declare satisfăcut cu o asemenea teorie:

Unii fizicieni, între care mă număr și eu, nu pot să creadă că trebuie să abandonăm, efectiv și pentru totdeauna, ideea reprezentării directe a realității fizice în spațiu și timp; sau că trebuie să acceptăm punctul de vedere după care evenimentele din natură sunt analoage unui joc de noroc.²

De fapt, apărătorii și criticii noii mecanici cuantice au fost de la început de acord într-o singură privință, și anume că aceasta nu satisface cerințe consacrate ale descrierii fizice. Tocmai particularități care disting mecanica cuantică de teoriile fizice anterioare au constituit temeiul delimitării celei dintâi de ceea ce fizicienii au convenit să numească, de acum înainte, „fizică

1. Pentru o expunere și o analiză detaliată a acestei poziții, vezi și Nathan Rosen, „Kann man die quantenmechanische Beschreibung der physikalischen Wirklichkeit als vollständig betrachten?“, în Peter C. Aichelburg, Roman U. Sexl (Hrsg.), *Albert Einstein: Sein Einfluß auf Physik, Philosophie und Politik*, Vieweg, Braunschweig, 1979, pp. 59–70.

2. „Fundamentele fizicii teoretice” (1940), în A. Einstein, *Cum văd eu lumea*, p. 150.

clasică". În „Editorialul” pe care l-a scris pentru un grup de articole consacrate interpretării mecanicii cuantice din revista *Dialectica*, Wolfgang Pauli exprima această idee caracterizând mecanica cuantică drept o „revizuire generalizatoare a idealurilor care stau la baza acelei descrieri a naturii pe care o numim astăzi clasică”¹. De o „revizuire” este vorba aici în primul rând în sensul că, pe baza informațiilor despre caracteristicile de stare ale unui sistem fizic, aparatul matematic al noii teorii nu permite decât formularea unor predicții probabiliste cu privire la rezultatele experimentelor viitoare. Altfel spus, teoria nu face posibilă, în principiu, formularea unor enunțuri cu privire la evenimente localizate în spațiu și timp, ci numai cu privire la probabilități ale producerii unor asemenea evenimente. Față de această concluzie s-au conturat două reacții diametral opuse. Prima constă în calificarea teoriei drept incompletă și în căutarea unei explicații satisfăcătoare a faptelor experimentale prin elaborarea unei teorii de factură clasică. A doua reacție pornește de la acceptarea sugestiei că, odată cu pătrunderea cercetării într-un nou domeniu, anumite cerințe ale descrierii naturii vor trebui să fie revizuite.

Punctul de pornire al așa-numitei interpretări de la Copenhaga a mecanicii cuantice, o interpretare al cărei profil a fost modelat în mod hotărâtor de fizicianul danez Niels Bohr, a fost acela că reprezentările consacrate despre condițiile unei descrieri și explicații teoretice adecvate a fenomenelor fizice nu pot fi aplicate pur și simplu rezultatelor noilor cercetări asupra atomului. Werner Heisenberg, discipolul și colaboratorul lui Bohr, obișnuia să caracterizeze aceste reprezentări prin două cerințe, cerința descrierii comportamentului sistemelor fizice individuale în spațiu și timp și cerința ca acest comportament să fie descris prin legi deterministe, fără a ține

1. Wolfgang Pauli, „Editorial”, *Dialectica*, vol. 2, nr. 3-4 (1948), p. 311.

seama de actul observării acelor sisteme. În istoria fizicii moderne nu a survenit niciodată o provocare atât de radicală cum a fost sugestia că aceste cerințe vor trebui să fie abandonate în fizica cuantelor. O asemenea sugestie, formulată atât de Bohr, cât și de Heisenberg încă din 1927, i-a divizat pe fizicienii teoreticieni în chestiuni care țin de fundamentele științei lor. În timp ce cercetătorii care s-au raliat interpretării de la Copenhaga au socotit că mecanica cuantică constituie o etapă cu totul nouă în evoluția istorică a cunoașterii naturii, adversarii lor respingeau din capul locului sugestia că cerințe consacrate ale descrierii teoretice în fizică ar trebui să fie reconsiderate, că numai în acest fel vor putea fi înțelese noi date ale experienței.

De ce nu au acceptat cercetători de talia lui Einstein sau Schrödinger că cerințe fundamentale ale descrierii naturii ar trebui să fie reexamineate în lumina acelor descoperiri experimentale care au inaugurat fizica cuantelor? Răspunsul ar putea fi că există temeuri demne de atenție pentru a crede că în acel cadru pe care îl prescriu cerințele clasice ale descrierii naturii va putea fi elaborată, în cele din urmă, o explicație satisfăcătoare a efectelor cuantice.

La capătul unei prezentări și discuții a dezacordului dintre Einstein și susținătorii interpretării de la Copenhaga, cunoscutul istoric al fizicii moderne Gerald Holton nota: „Aceste reacții de respingere ale lui Einstein, la fiecare întâlnire, i-au lăsat lui Heisenberg o rană dureroasă [...]. Până la moartea lui, în 1962, Niels Bohr a fost de asemenea profund întristat de refuzul lui Einstein”¹. În epoca lui Einstein și chiar mai târziu, mulți dintre fizicienii care afirmău că „nu înțeleg teoria cuantelor” aveau în vedere, în mod evident, că această teorie nu vine în întâmpinarea unor așteptări cu privire la

1. G. Holton, „Werner Heisenberg and Albert Einstein“, comunicare prezentată la simpozionul *Creating Copenhagen*, City University of New York, martie 2000.

ceea ce ar trebui să ofere descrierea oricărui domeniu al experienței fizice.¹ Mai recent, fizicianul Frank Wilczek încheia un articol cu următoarea remarcă: „Pentru a rezuma, simt că, după 75 de ani și nenumărate aplicații încununate de succes, suntem încă la o distanță de doi pași mari de a înțelege cum trebuie teoria cuantică”². Autorul nu ne spune care ar fi cei doi pași.

Ne putem întreba dacă comentarii de acest fel merg pe linia plângerilor exprimate deja de mari fizicieni ai secolului trecut cu privire la înțelegerea fizicii cuantelor. Murray Gell-Mann afirmase: „Mecanica cuantică, acea disciplină misterioasă și încălțată pe care nimeni dintre noi nu o înțelege de fapt, dar pe care știm, totuși, să o folosim”. Richard Feynman a fost și mai categoric: „Cred că pot să spun, cu deplină siguranță, că nimeni nu înțelege mecanica cuantică”³.

În acest punct se impune să revenim la o observație formulată mai sus. Nu toți cei care folosesc în munca lor mecanica cuantică resimt puternic nevoia de „a înțelege” teoria, prin raportare la cerințe de genul celor menționate. Urmărind să aducă o contribuție la rezolvarea unei probleme determinate, cercetătorul obișnuit va folosi mecanica cuantică drept instrument de lucru. Înțelegerea teoriei, adică ceea ce am putea numi „filozofia cuantelor”, nu va intra în câmpul intereselor

1. Iată o exprimare caracteristică a lui Einstein din anii săi mai târzii: „Ceea ce nu mă satisface din punct de vedere principal în această teorie este atitudinea ei față de ceea ce îmi apare ca fiind obiectivul programatic al întregii fizici: descrierea completă a stărilor reale (individuale), care sunt posibile potrivit legilor naturii” („Note autobiografice”, p. 211). Reține atenția îndeosebi referirea la „un obiectiv programatic al întregii fizici”. Că există un asemenea obiectiv „al întregii fizici” este una dintre presupuzițiile de la care pleacă mulți critici ai interpretării de la Copenhaga a mecanicii cuantice.

2. „What is Quantum Theory?“, *Physics Today*, vol. 53, nr. 6 (2000), p. 12.

3. *Apud* J.T. Cushing, *Concepte filozofice în fizică*, p. 331.

și preocupărilor sale. În capitolul consacrat mecanicii cuantice din cartea sa *Visul unei teorii finale*, Steven Weinberg sublinia cât de puțin relevantă este această „filozofie“ pentru utilizarea curentă a teoriei. S-a observat, nu o dată, că, pe măsură ce ne îndepărtăm de anii în care interpretarea mecanicii cuantice a stat în centrul preocupărilor unora dintre cei mai de seamă fizicieni, interesul cercului larg de cercetători pentru această temă a scăzut.¹ Este o tendință care s-a exprimat, între altele, prin considerarea conceptului de complementaritate, formulat de Bohr, drept un adaos superfluu în expunerea fundamentelor fizicii cuantice. Consultarea expunerilor fundamentelor mecanicii cuantice în tratate și manuale este edificatoare din acest punct de vedere.

Mai recent, o astfel de poziție a fost foarte clar exprimată, într-un text cu titlul „Teoria cuantică nu are nevoie de interpretare“. Referindu-se la acele considerații ale fizicienilor care

1. Orientarea cercetării prin finanțarea de proiecte nu a favorizat cercetările orientate în această direcție. Se relatează că un fizician de talia lui John Bell s-a ocupat de fundamentele fizicii cuantelor în timpul său liber. Fizicianului Alain Aspect, un tânăr cercetător francez care se interesa de testarea experimentală a „inegalităților lui Bell“, el i-a spus în 1975 că, dacă nu are o poziție permanentă, nu-l sfătuiește să se consacre unor asemenea preocupări (*apud* Adam Becker, *What is Real? The Unfinished Quest for the Meaning of Quantum Physics*, Basic Books, New York, 2018, pp. 215, 218). Referindu-se la anii '60 și '70 ai secolului trecut, fizicianul John Clauser își amintea că Societatea Americană de Fizică, cea care edita principalele reviste de specialitate, le recomanda referenților să respingă toate articolele despre fundamentele mecanicii cuantice care nu erau bazate pe considerații matematice și nu formulau noi predicții experimentale. Adică cele care conțineau reflecții generale privitoare la înțelegerea fizicii cuantelor. Clauser observa că, potrivit unor asemenea reguli, nici răspunsul lui Bohr la articolul lui Einstein, Podolsky și Rosen, nici articolul lui Bohm nu ar fi putut fi publicate! (*apud* Jean Bricmont, *Making Sense of Quantum Mechanics*, Springer, Cham, 2016, p. 281).

încearcă să răspundă la întrebarea ce ne spune fizica cuantelor despre realitatea fizică, autorii scriau:

Contrar acestor dorințe, teoria cuantică *nu* descrie realitatea fizică. Ceea ce face ea este să ofere un algoritm pentru a calcula *probabilități* ale evenimentelor macroscopice care sunt consecințele intervenției noastre experimentale. Definiția strictă a domeniului teoriei cuantice este singura interpretare de care au nevoie fie experimenterii, fie teoreticienii.

Discuțiile despre semnificația generală a teoriei, discuții a căror încărcătură filozofică nu poate fi trecută cu vederea, li se par nerodnice. Concluzia este că, dacă vrem să facem din mecanica cuantică „un ghid util pentru fenomenele din jurul nostru, nu avem nevoie de nimic altceva decât de o teorie pe deplin consistentă, teorie pe care o avem deja. Teoria cuantică nu are nevoie de «interpretare»“. Faptul că interpretarea mecanicii cuantice este o temă filozofică este pus în evidență, subliniază autorii, de observația că între interpretări nu se poate distinge și arbitra prin experimente. Este interesant de remarcat că în argumentarea ideii autorilor se strecoară, totuși, și unele considerații de natură filozofică. Afirmatia că „teoria cuantică *nu* descrie realitatea fizică“ este una dintre ele. Iată și alta: „Poate deci exista o «realitate micro» din care orice amănunt este descris în mod complet? O descriere de acest gen nu va putea fi dată nici de teoria cuantică, nici de orice altă teorie rezonabilă“. Autorii mai observă că teoria cuantică a fost acuzată de incompletitudine deoarece ea nu poate răspunde unor întrebări care apar rezonabile din punctul de vedere clasic. Ei se explică astfel:

De exemplu, nu există nici o cale pentru a stabili dacă un sistem individual este într-o stare pură sau este parte a unui sistem constituit din părți care sunt corelate [*entangled*]. Mai mult, nu există o descriere dinamică pentru „colapsul“ funcției de undă. În ambele cazuri, teoria nu dă răspunsuri deoarece funcția de undă nu are o realitate obiectivă. Colapsul este ceva ce are loc în descrierea pe

care o dăm noi sistemului, nu în sistemul însuși. Tot așa, dependența de timp a funcției de undă nu reprezintă evoluția unui sistem fizic. Ea oferă doar evoluția probabilităților noastre pentru rezultatele unor experimente potențiale asupra acestui sistem. Aceasta este singura semnificație a funcției de undă.¹

Dezinteresul pentru interpretarea noii teorii era împărtășit deja de mulți fizicieni din generația lui Bohr. Abraham Pais, biograful lui Einstein și Bohr, relatează că l-a întrebat pe George Uhlenbeck, un fizician activ în perioada în care a apărut articolul lui Einstein, Podolsky și Rosen, precum și replica lui Bohr, ce-și amintește despre reacțiile colegiilor. El i-a răspuns că nici unul dintre cercetătorii cunoscuți de el nu a acordat atenție acestei dispute. Tot așa, în anii '50 și mai târziu, puțini fizicieni teoreticieni au manifestat interes față de controversa dintre David Bohm, care susținea posibilitatea explicării corelațiilor stabilite de mecanica cuantică prin „parametri ascunși“, și reprezentanții ai școlii de la Copenhaga. Concentrându-se asupra unor probleme de natură matematică sau experimentală, aceștia își declinau orice competență în astfel de discuții. În epoca ce s-a numit *Big Science*, această tendință s-a accentuat.

Cercetători de seamă au adoptat însă o poziție diferită. Ei nu au ezitat să afirme că, spre deosebire de utilizarea teoriei pentru imaginarea unor noi experimente și pentru predicția rezultatelor lor, ca și pentru corelarea și explicarea multor date experimentale stabilite anterior, „înțelegerea“ ei implică angajări de ordin filozofic. Printre obiectivele centrale ale înțelegerii fizicii cuantelor este clarificarea relației dintre experimentele care stau la baza teoriei și conceptele fizicii clasice. Heisenberg s-a exprimat probabil cel mai clar în această privință: „Ceea ce s-a născut la Copenhaga în 1927 nu a fost

1. Christopher A. Fuchs, Asher Peres, „Quantum Theory needs no „Interpretation“, *Physics Today*, vol. 53, nr. 3, (2000), pp. 70–71.