

CEVA PROFUND ASCUNS

**LUMILE
CUANTICE**

**ȘI EMERGENȚA
SPAȚIULUI-TIMP**

SEAN CARROLL

CEVA PROFUND ASCUNS

LUMILE
CUANTICE

ȘI EMERGENȚA
SPAȚIULUI-TIMP

Traducere din engleză
de Walter Fotescu

 HUMANITAS
BUCUREȘTI

Redactor: Vlad Zografi
Coperta: Ioana Nedelcu
Tehnoredactor: Manuela Măxineanu
DTP: Florina Vasiliu, Dan Dulgheru

Tipărit la Livco Design

Sean Carroll

Something Deeply Hidden: Quantum Worlds and the Emergence of Spacetime
Copyright © 2019 by Sean Carroll. All rights reserved.

© HUMANITAS, 2024, pentru prezenta versiune în limba română

Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României

Carroll, Sean

Ceva profund ascuns: lumile cuantice și emergența spațiului-timp /
Sean Carroll; trad. din engleză de Walter Fotescu. –

București: Humanitas, 2024

Conține bibliografie

ISBN 978-973-50-8395-3

I. Fotescu, Walter (trad.)

53

EDITURA HUMANITAS

Piața Presei Libere 1, 013701 București, România

tel. 021/408 83 50, fax 021/408 83 51

www.humanitas.ro

Comenzi online: www.libhumanitas.ro

Comenzi prin e-mail: vanzari@libhumanitas.ro

Comenzi telefonice: 0723 684 194

Gânditorilor care, de-a lungul istoriei,
au rămas pe poziții pentru cauze drepte

Cuprins

Prolog: Nu vă fie teamă	9
PARTEA I: FANTOMATIC	
1. Ce se întâmplă: Examinând lumea cuantică	17
2. Formularea curajoasă: Mecanica cuantică austeră	31
3. De ce să crezi așa ceva? Cum a apărut mecanica cuantică	46
4. Ceea ce nu poate fi cunoscut fiindcă nu există: Incertitudine și complementaritate	71
5. Corelați în cer: Funcții de undă cu componente multiple	91
PARTEA A II-A: DIVIZARE	
6. Divizarea universului: Decoerență și lumi paralele	109
7. Ordine și aleatoriu: De unde provin probabilitățile	127
8. Acest angajament ontologic mă face să arăt gras? Un dialog socratic despre enigmele cuantice	149
9. Alte căi: Alternative la teoria Lumilor Multiple	173
10. Latura umană: Trăind și gândind într-un univers cuantic	200
PARTEA A III-A: SPAȚIUL-TIMP	
11. De ce există spațiul? Emergență și caracter local	223
12. O lume de vibrații: Teoria cuantică a câmpurilor	239
13. Respirând în spațiul vid: Descoperirea gravitației în mecanica cuantică	257
14. Dincolo de spațiu și timp: Holografie, găuri negre și limitele caracterului local	279

Epilog: Totul e cuantic.....	295
Anexă: Povestea particulelor virtuale	298
Mulțumiri	307
Sugestii pentru lecturi suplimentare	309
Referințe bibliografice.....	311

Prolog

Nu vă fie teamă

Nu ai nevoie de un doctorat în fizică teoretică ca să-ți fie teamă de mecanica cuantică. Dar nici nu strică.

Poate părea ciudat. Mecanica cuantică e cea mai bună teorie a noastră despre lumea microscopică. Ea descrie modul cum interacționează atomii și particulele prin intermediul forțelor naturii și face predicții experimentale incredibil de precise. Fără îndoială, mecanica cuantică are reputația de a fi dificilă, misterioasă, la limita magiei. Dar, dintre toți oamenii, fizicienii profesioniști ar trebui să se simtă relativ în largul lor cu o astfel de teorie. Ei fac mereu calcule complicate implicând fenomene cuantice și construiesc instalații gigantice pentru a testa rezultatele predicțiilor. Nu cumva sugerăm că fizicienii au mistificat lucrurile în tot acest timp?

Ei n-au mistificat nimic, dar nici n-au fost complet sinceri cu ei înșiși. Pe de o parte, mecanica cuantică e inima și sufletul fizicii moderne. Astrofizicieni, fizicieni ai particulelor, fizicieni atomiști, specialiști în lasere – toți folosesc încontinuu mecanica cuantică, și cu multă competență. Nu e doar o chestiune de cercetare ezoterică. Mecanica cuantică e omniprezentă în tehnologia modernă. Semiconductori, tranzistori, microcipuri, lasere și memorii de calculator, toate se bazează pe mecanica cuantică pentru a funcționa. La drept vorbind, mecanica cuantică e necesară pentru a explica trăsăturile fundamentale ale lumii înconjurătoare. Ca să înțelegi cum strălucește Soarele sau de ce mesele sunt solide ai nevoie de mecanică cuantică.

Imaginați-vă că închideți ochii. E de așteptat să fie destul de întuneric. Poate credeți că e firesc, dat fiind că nu pătrunde lumina. Dar nu e într-un tot adevărat; lumina infraroșie, cu o lungime de undă puțin mai mare decât lumina vizibilă, e emisă tot timpul de orice obiect cald, inclusiv propriul nostru corp. Dacă ochii noștri ar fi la fel de sensibili la lumina infraroșie ca la lumina vizibilă, am fi orbiți chiar și atunci când pleoapele sunt închise, de la toată lumina emisă de înșiși globii oculari. Dar bastonașele și conurile care acționează ca receptori de lumină în ochi sunt în chip ingenios sensibile la lumina vizibilă, nu la cea infraroșie. Cum izbutesc? În ultimă instanță, răspunsul îl oferă mecanica cuantică.

Mecanica cuantică nu e magie. E perspectiva noastră cea mai profundă și mai cuprinzătoare asupra lumii. Din câte știm în prezent, mecanica cuantică nu e doar o aproximație a adevărului; ea este adevărul. O afirmație care ar putea fi revizuită în fața unor rezultate experimentale neașteptate, dar până acum nu avem indicii ale vreunei asemenea surprize. Dezvoltarea mecanicii cuantice în primii ani ai secolului XX, implicând nume precum Planck, Einstein, Bohr, Heisenberg, Schrödinger și Dirac, ne-a lăsat în 1927 o teorie matură care este cu siguranță una dintre cele mai mari realizări intelectuale din istoria omenirii. Avem toate motivele să fim mândri.

Pe de altă parte, Richard Feynman spunea: „Cred că pot afirma fără teama de a greși că nimeni nu înțelege mecanica cuantică.“ *Folosim* mecanica cuantică pentru a proiecta noi tehnologii și a prezice rezultatele experimentelor. Dar fizicienii onești recunosc că nu *înțelegem* cu adevărat mecanica cuantică. Avem o rețetă pe care o putem aplica fără riscuri în anumite situații prestabilite, și care furnizează predicții uluitoare de precise, confirmate în mod triumfător de datele experimentale. Dar, dacă vrem să mergem mai adânc și ne întrebăm ce se întâmplă de fapt, pur și simplu nu știm. Fizicienii tind să trateze mecanica cuantică asemenea unui robot lipsit de rațiune, pe care se bazează pentru îndeplinirea anumitor sarcini, iar nu ca pe un prieten drag de care le pasă la nivel personal.

Această atitudine a profesioniștilor pătrunde și în felul în care e explicată mecanica cuantică unor cercuri mai largi. Am vrea să prezentăm o imagine completă a naturii, dar nu prea putem, deoarece fizicienii n-au căzut de acord asupra a ceea ce spune de fapt mecanica cuantică. În schimb, lucrările de popularizare tind să sublinieze că mecanica cuantică e misterioasă, deconcertantă, imposibil de înțeles. Mesajul acesta contravine principiilor de bază pe care le susține știința, printre ele ideea că lumea e în esență inteligibilă. Avem un fel de blocaj mental când vine vorba de mecanica cuantică, și e nevoie de puțină terapie cuantică pentru a-l depăși.

*

Când le predăm mecanica cuantică studenților, îi învățăm o listă de reguli. Unele sunt de un tip familiar: o descriere matematică a sistemelor cuantice, plus o explicație a modului cum evoluează în timp asemenea sisteme. Dar există apoi un grup de reguli care n-au analog în nici o altă teorie din fizică. Aceste reguli suplimentare ne spun ce se întâmplă când *observăm* un sistem cuantic, iar comportamentul acela e complet diferit de felul în care se comportă sistemul când nu-l observăm. Ce se petrece oare?

În esență, sunt două posibilități. Una este că povestea pe care le-o spunem studenților e lamentabil de incompletă, iar pentru ca mecanica cuantică să îndeplinească cerințele unei teorii de bun-simț trebuie să înțelegem ce este o „măsurătoare“ sau o „observație“, și de ce sistemul pare să se comporte atât de diferit. Cealaltă posibilitate e ca mecanica cuantică să reprezinte o ruptură completă cu felul în care am conceput fizica până acum, trecând de la o viziune în care lumea există în mod obiectiv și independent de percepția noastră la una în care actul observației e într-un fel sau altul fundamental pentru natura realității.

În orice caz, manualele ar trebui să acorde timpul cuvenit pentru explorarea acestor opțiuni și să admită că, deși mecanica cuantică se bucură de un succes extraordinar, încă nu putem pretinde că dezvoltarea ei s-a încheiat. Manualele nu pretind așa ceva. Majoritatea lor trec sub tăcere acest aspect, preferând să

rămână în zona de confort a fizicianului, în care scriu ecuații și îi pun pe studenți să le rezolve.

E jenant. Și asta încă nu e totul.

S-ar putea crede, dată fiind această situație, că încercarea de a înțelege mecanica cuantică e de departe cel mai important obiectiv din întreaga fizică. Subvenții de milioane de dolari curg spre cercetătorii din domeniul fundamentelor cuantice, mințile cele mai strălucite dau buzna să studieze problema, iar rezultatele cele mai importante sunt recompensate cu premii și prestigiu. Universitățile se întrec să atragă principalele personalități din domeniu, ademenindu-le cu salarii de vedetă pentru a le îndepărta de instituțiile rivale.

Din păcate, nu-i așa. Nu numai că încercarea de a înțelege mecanica cuantică nu e privită ca o specialitate cu statut elevat în fizica modernă; în multe medii e considerată prea puțin respectabilă, dacă nu e denigrată de-a dreptul. În majoritatea departamentelor de fizică nu există nimeni care să lucreze la această problemă, iar cei care aleg s-o facă sunt priviți cu suspiciune. (De curând, în timp ce scriam o cerere de subvenție, am fost sfătuit să mă concentrez pe lucrările mele din domeniile gravitației și cosmologiei, considerate legitime, și să le omit pe cele despre fundamentele mecanicii cuantice, fiindcă așa părea mai puțin serios.) S-au făcut progrese semnificative în ultimii nouăzeci de ani, dar îndeobște de către indivizi încăpățânați care considerau că problemele sunt importante, indiferent ce le spuneau colegii lor, sau de către studenți tineri și imprudenți, care ulterior au părăsit complet domeniul.

Într-una dintre fabulele lui Esop, o vulpe vede un ciorchine de struguri zemoși și sare să-l apuce, dar nu poate sări destul de sus. Frustrată, ea declară că strugurii probabil sunt acri și oricum niciodată nu i-a poftit cu adevărat. Vulpea îi reprezintă pe „fizicieni”, iar strugurii sunt „înțelegerea mecanicii cuantice”. Mulți cercetători au decis că a înțelege cum funcționează în realitate natura n-a fost niciodată cu adevărat important; tot ce contează e capacitatea de-a face anumite predicții.

Oamenii de știință sunt educați să prețuiască rezultatele tangibile, indiferent dacă e vorba de descoperiri experimentale captivante sau de modele teoretice cantitative. Ideea de a lucra pentru a înțelege o teorie pe care deja o avem, chiar dacă acel efort s-ar putea să nu ducă la nici o nouă tehnologie sau predicție concretă, poate fi o marfă greu de vândut. Tensiunea subiacentă a fost ilustrată în serialul TV *The Wire*, în care un grup de detectivi au muncit din greu timp de câteva luni pentru a strânge cu meticulozitate dovezi care să acuze o puternică rețea de traficanți de droguri. Între timp, șefii lor n-aveau răbdare pentru asemenea frivolități. Ei voiau să aibă droguri pe masă pentru următoarea conferință de presă, și au încurajat poliția să forțeze lucrurile și să facă arestări răsunătoare. Agențiile de finanțare și comitetele de angajare sunt la fel ca șefii aceia. Într-o lume în care toate stimulentele ne împing spre rezultate concrete, cuantificabile, preocupările generale, considerate mai puțin presante, pot fi date deoparte în goana către următorul obiectiv imediat.

*

Cartea de față are trei mesaje principale. Primul este că mecanica cuantică trebuie să fie inteligibilă – chiar dacă nu am ajuns încă acolo –, iar a dobândi această înțelegere trebuie să fie un obiectiv prioritar al științei moderne. Mecanica cuantică e unică între teoriile fizice prin aceea că face o aparentă distincție între *ce vedem* și *ce există în realitate*. Aceasta reprezintă o provocare aparte pentru mințile oamenilor de știință (și ale tuturor celorlalți), care sunt obișnuiți să considere ceea ce vedem ca indubitabil „real” și lucrează pentru a explica lucrurile în mod corespunzător. Dar nu e o problemă insurmontabilă, și, dacă ne eliberăm mintea de anumite moduri de gândire învechite și intuitive, constatăm că mecanica cuantică nu e iremediabil mistică sau inexplicabilă. E doar fizică.

Al doilea mesaj este că am făcut progrese reale în direcția înțelegerii. Mă voi concentra asupra abordării pe care o consider în mod evident calea cea mai promițătoare, formularea Everett, sau a Lumilor Multiple, a mecanicii cuantice. Abordarea Lumilor

Multiple a fost acceptată cu entuziasm de mulți fizicieni, dar ea are o reputație îndoielnică printre oamenii cărora le repugnă proliferarea altor realități care conțin copii ale lor. Dacă vă numărați printre aceștia, vreau cel puțin să vă convingeți că Lumile Multiple sunt modul *cel mai pur* de a înțelege mecanica cuantică – este locul unde ajungem dacă urmăm calea minimei rezistențe luând în serios fenomenele cuantice. În particular, Lumile Multiple sunt o predicție a formalismului deja instituit, nu ceva adăugat din condei. Dar Lumile Multiple nu sunt singura abordare respectabilă, și vom menționa câțiva dintre principalii săi competitori. (Mă voi strădui să fiu imparțial, chiar dacă nu neapărat echilibrat.) Aspectul important este că diversele abordări sunt toate teorii științifice bine construite, cu ramificații experimentale posibil diferite, și nu doar „interpretări“ confuze, bune de dezbătut la un coniac și o țigară după ce am încheiat munca adevărată.

Al treilea mesaj este că toate aceste lucruri contează, și nu doar pentru integritatea științei. Succesul de până acum al cadrului existent al mecanicii cuantice, adecvat-dar-nu-perfect-coerent, nu trebuie să ne facă să uităm că există situații în care o asemenea abordare nu e la înălțimea sarcinii. În particular, dacă vrem să înțelegem natura spațiului-timp și originea și destinul final al întregului univers, bazele mecanicii cuantice sunt absolut esențiale. Voi prezenta câteva propuneri noi, captivante și fără îndoială conjecturale, care stabilesc legături provocatoare între corelarea cuantică [*quantum entanglement*] și modul cum se deformează și se curbează spațiul-timp – fenomenul pe care îl cunoaștem ca „gravitație“. De mulți ani deja, căutarea unei teorii cuantice complete și convingătoare a gravitației e recunoscută ca un obiectiv științific important (prestigiu, premii, atragerea cercetătorilor de la alte universități etc.). Poate că secretul nu e să pornim cu gravitația și s-o „cuantificăm“, ci să investigăm mai aprofundat mecanica cuantică însăși și să descoperim că gravitația pândește acolo de la bun început.

Nu știm cu certitudine. Aceasta e emoția și anxietatea cercetării de vârf. Dar a venit momentul să luăm în serios natura fundamentală a realității, iar asta presupune să înfruntăm deschis mecanica cuantică.

PARTEA I

FANTOMATIC

1. Ce se întâmplă

Examinând lumea cuantică

Albert Einstein, care manevra cuvintele la fel de abil ca ecuațiile, a fost cel care a pus mecanicii cuantice eticheta de care ea n-a reușit să se dezbrace nici până în ziua de azi: *spukhaft*, tradus de obicei din germană în engleză prin *spooky* (fantomatic). Cel puțin aceasta e impresia cu care rămânem din majoritatea discuțiilor publice despre mecanica cuantică. Ni se spune că este o parte a fizicii inevitabil obscură, ciudată, bizară, incognoscibilă, stranie, derutantă. Fantomatică.

Inscrutabilitatea poate fi fascinantă. Asemenea unui străin misterios și sexy, mecanica cuantică ne ispitește să-i atribuim tot felul de calități și capacități, indiferent dacă le are sau nu. O scurtă trecere în revistă a cărților care conțin cuvântul „cuantic“ în titlu dezvăluie următoarea listă de pretinse aplicații:

Succes cuantic; conducere cuantică; conștiință cuantică; atingere cuantică; yoga cuantică; alimentație cuantică; psihologie cuantică; minte cuantică; glorie cuantică; iertare cuantică; teologie cuantică; fericire cuantică; poezie cuantică; didactică cuantică; credință cuantică; iubire cuantică.

Un rezumat impresionant pentru o ramură a fizicii deseori considerată relevantă numai pentru procesele microscopice implicând particule subatomice.

Ca să fim riguroși, mecanica cuantică – sau „fizica cuantică“, sau „teoria cuantică“, termenii sunt sinonimi – e relevantă nu

doar pentru procesele microscopice. Ea descrie întreaga lume, de la voi și mine până la stele și galaxii, de la centrele găurilor negre la începuturile universului. Dar numai dacă privim lumea la o scară extrem de mică aparenta stranietate a mecanicii cuantice devine inevitabilă.

Una dintre temele acestei cărți este că mecanica cuantică nu merită conotația de fantomatic, în sensul unui mister inefabil pe care mintea omenească nu-l poate înțelege. Mecanica cuantică e *uimitoare*; e nouă, profundă, lărgeste orizontul mental și este o viziune asupra realității foarte diferită de cea cu care eram obișnuiți. Așa e uneori știința. Dar dacă subiectul pare dificil sau enigmatic, atitudinea științifică este să rezolvăm enigma, nu să pretindem că ea nu există. Avem toate motivele să credem că putem face asta pentru mecanica cuantică la fel ca pentru oricare altă teorie fizică.

Multe expuneri ale mecanicii cuantice urmează o schemă tipică. Mai întâi ele indică un fenomen cuantic ce contravine intuiției. Pe urmă, ele exprimă consternarea că e posibil ca lumea să arate astfel și disperarea de a găsi un sens. În sfârșit (dacă ai noroc), ele încearcă un fel de explicație.

Atitudinea noastră e să prețuim claritatea mai presus de mister, și de aceea nu vreau să adopt această strategie. Vreau să prezint mecanica cuantică într-un mod care o va face maximal inteligibilă dintru început. Ea va părea în continuare stranie, dar aceasta e natura ei intrinsecă. Sper însă că nu va părea inexplicabilă sau neinteligibilă.

Nu vom face nici un efort să urmărim ordinea istorică. În acest capitol vom examina principalele fapte experimentale care ne obligă să luăm în considerare mecanica cuantică, iar în următorul vom schița succint abordarea Lumilor Multiple pentru a explica acele observații. Abia în capitolul al treilea vom oferi o prezentare semi-istorică a descoperirilor care i-au condus prima oară pe fizicieni să examineze un tip de fizică de o asemenea noutate. După care vom lămuri cât de spectaculoase sunt în realitate unele implicații ale mecanicii cuantice.