

Epistemologia teoriei corzilor în gravitația cuantică

Nicolae Sfetcu

25.07.2019

Sfetcu, Nicolae, "Epistemologia teoriei corzilor în gravitația cuantică", SetThings (25 iulie 2019), DOI: 10.13140/RG.2.2.13066.41924, URL = <https://www.setthings.com/ro/epistemologia-teoriei-corzilor-in-gravitatia-cuantica/>

Email: nicolae@sfetcu.com



Acest articol este licențiat Creative Commons Attribution-NoDerivatives 4.0 International. Pentru a vedea o copie a acestei licențe, vizitați <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>.

În teoria câmpului cuantic, principalul obstacol este apariția infinităților netratabile în interacțiunile particulelor datorită posibilității unor distanțe arbitrare între particulele punctuale. Corzile, ca obiecte extinse, oferă un cadru mai bun, care permite calcule finite.¹ Teoria corzilor face parte dintr-un program de cercetare în care particulele punctuale din fizica particulelor sunt înlocuite de obiecte unidimensionale numite *corzi*. Ea descrie modul în care aceste corzi se propagă prin spațiu și interacționează una cu cealaltă. La scale de dimensiuni mai mari, o coardă arată ca o particulă obișnuită, cu masa, sarcina și alte proprietăți determinate de starea vibrațională a corzii. Una din stările vibraționale ale corzilor corespunde gravitonului, particula ipotetică din mecanică cuantică pentru forța gravitațională.² Teoria corzilor se manifestă de obicei în cazul energiilor foarte mari, precum în fizica găurilor negre, cosmologia universului timpuriu, fizica nucleară și fizica materiei condensate. Teoria corzilor încearcă să unifice gravitația și fizicii particulelor, iar versiunile ei ulterioare încearcă să modifice toate forțele fundamentale din fizică.³

Scopul teoriei corzilor a fost înlocuirea particulelor elementare cu corzi unidimensionale pentru a se putea face unificarea fizicii cuantice și a gravitației.

Programul de cercetare al teoriei corzilor se bazează pe o presupunere din 1930, conform căreia relativitatea generală seamănă cu teoria unui câmp de spin-doi fără masă, în spațiul plat minkowskian.⁴ Cuantificarea unei astfel de teorii s-a dovedit a nu fi renormalizabilă perturbativ, implicând infinități care nu pot fi eliminate. Această teorie timpurie a fost abandonată până pe la mijlocul anilor 1970, când s-a dezvoltat că o teorie a corzilor unidimensionale.

De remarcat că teoria corzilor a fost inițial dezvoltată, la sfârșitul anilor 1960 și începutul anilor 1970, în fizica particulelor - *teoria corzilor bosonice*, care s-a ocupat doar de bosoni. După un succes temporar ca o teorie a hadronilor, cromodinamica cuantică a fost recunoscută drept teoria corectă a hadronilor. În 1974 Tamiaki Yoneya a descoperit că teoria prevede o particulă masivă de spin 2, considerată a fi un graviton. John Schwarz și Joel Scherk au reintrodus teoria lui Kaluza-Klein pentru dimensiunile suplimentare, a recuperat programul de bootstrap abandonat, și astfel a început programul de cercetare a teoriei corzilor în gravitația cuantică. Un exemplu tipic de

¹ Richard Dawid, „Scientific Realism in the Age of String Theory”, *Physics and Philosophy*, 2007.

² Katrin Becker, Melanie Becker, și John H. Schwarz, *String Theory and M-Theory: A Modern Introduction* (Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 2007), 2–3.

³ Becker, Becker, și Schwarz, 3, 15–16.

⁴ A. Capelli, „The Birth of String Theory Edited by Andrea Cappelli”, Cambridge Core, aprilie 2012, <https://doi.org/10.1017/CBO9780511977725>.

revigorare a unui program de cercetare în sensul lui Lakatos (programul de bootstrap) și schimbare a direcției de cercetare a altui program (teoria corzilor) a cărei euristică, prin adăugarea unei teorii suplimentare (Kaluza-Klein), s-a dovedit mult mai utilă în altă direcție decât cea prevăzută inițial. Ulterior s-a dezvoltat în *teoria supercorzilor*, pe baza supersimetriei între bosoni și fermioni,⁵ apărând apoi și alte versiuni ale teoriei. La mijlocul anilor 1990 oamenii de știință s-au concentrat pe dezvoltarea unui program de cercetare unificator, o teorie în unsprezece dimensiuni sub numele de *teoria M*.

Corzile nu au numere cuantice, dar diferă între ele prin forma topologică (deschise sau închise, moduri de compactizare) și dinamica lor (moduri de oscilație). Ele pot fi percepute la scară microscopică drept particule punctuale cu anumite numere cuantice. Schimbarea modului de oscilație corespunde unei transformări într-o altă particulă. Corzile la nivel fundamental nu au constante de cuplare. Interacțiunea dintre ele corespunde dinamicii lor.⁶

Pentru fiecare versiune a teoriei corzilor există un singur tip de coardă, ca o buclă mică sau un segment de coardă, care poate vibra în moduri diferite. În programul de cercetare al teoriei corzilor, scala lungimii caracteristice a corzilor este de ordinul lungimii Planck (10^{-35} metri), peste care se consideră că efectele gravitației cuantice devin semnificative.⁷ La dimensiuni obișnuite, astfel de obiecte nu se pot distinge de particule punctuale zero-dimensionale. Există mai multe variante ale teoriei supercorzilor: tip I, tip IIA, tip IIB și două tipuri de corzi heterotice, $SO(32)$ și $E_8 \times E_8$.

Teoriile corzilor necesită dimensiuni suplimentare ale spațiu-timpului, pentru consistența matematică. În teoria corzilor bosonice, spațiu-timpul este 26-dimensional, în timp ce în teoria supercorzilor este 10-dimensional, iar în teoria-M este 11-dimensional. Aceste dimensiuni suplimentare nu vor putea fi observate în experimente,⁸ datorită unei compactări a acestora prin care se "închid" pe ele însele formând cercuri. La limită, când aceste dimensiuni suplimentare tind către zero, se ajunge la spațiu-timpul obișnuit. Pentru ca teoriile să descrie corect lumea, dimensiunile compactate trebuie să fie în forma varietății topologice Calabi-Yau.⁹

⁵ Becker, Becker, și Schwarz, *String Theory and M-Theory*, 4.

⁶ Vincent Lam, „Quantum Structure and Spacetime.”, *Metaphysics in Contemporary Physics*, 1 ianuarie 2016, 81–99, https://doi.org/10.1163/9789004310827_005.

⁷ Becker, Becker, și Schwarz, *String Theory and M-Theory*, 6.

⁸ Barton Zwiebach, *A First Course in String Theory*, 2 edition (Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 2009).

⁹ Shing-Tung Yau, *The Shape of Inner Space*, Reprint edition (Basic Books, 2012), cap. 6.

O altă modalitate de reducere a numărului de dimensiuni este folosind scenariul cosmologiei membranelor ("brane-world"), considerând universul observabil ca un subspațiu tridimensional al unui spațiu cu mai multe dimensiuni. În aceste modele, gravitația apare din corzile închise aflate într-un spațiu cu mai multe dimensiuni, explicându-se astfel și puterea mai mică a gravitației în comparație cu celelalte forțe fundamentale.¹⁰ În teoria corzilor, o *brană* (prescurtarea de la "membrană") generalizează noțiunea de particulă punctuală la dimensiuni diferite de zero. Branele sunt corpuri fizice care se supun regulilor mecanicii cuantice.¹¹

O particularitate a teoriilor din acest program de cercetare sunt "dualitățile", transformări matematice care identifică teoriile fizice din cadrul acestui program între ele, trăgându-se concluzia că toate aceste teorii sunt subsumate uneia singure, teoria-M.¹² Două teorii sunt duale dacă sunt exact echivalente în ceea ce privește consecințele observaționale, deși sunt construite în mod diferit și pot implica diferite obiecte și scenarii topologice.¹³ Diferitele teorii din cadrul programului de cercetare al teoriei corzilor sunt legate între ele prin mai multe relații, una fiind relația specifică de corespondență numită dualitatea S.¹⁴ O altă relație, numită dualitatea T, ia în considerare corzi care se propagă în jurul unei dimensiuni circulare suplimentare. În 1997 s-a descoperit corespondența teoriei câmpurilor anti-de Sitter/conforme (AdS/CFT),¹⁵ care relaționează teoria corzilor cu o teorie a câmpului cuantic.¹⁶ Într-un cadru mai general, corespondența AdS/CFT este o dualitate care corelează teoria corzilor cu alte teorii fizice mai bine înțelese teoretic, cu implicații în studiul găurilor negre și gravitației cuantice, dar și în fizica nucleară¹⁷ și materia condensată.¹⁸

Dualitățile din teoria corzilor au fost conexe de filosofi cu probleme specifice filosofiei, precum subdeterminarea, convenționalismul și emergența/reducția. Astfel, spațiu-timpul a ajuns să fie considerat de unii fizicieni drept o entitate emergentă, care depinde, de ex., e puterea de cuplare care guvernează interacțiunile fizice. Conform

¹⁰ Lisa Randall și Raman Sundrum, „An Alternative to Compactification”, *Physical Review Letters* 83, nr. 23 (6 decembrie 1999): 83 (23): 4690–4693, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.4690>.

¹¹ Gregory Moore, „What Is... a Brane?”, *Notices of the American Mathematical Society* 52, nr. 2 (28 noiembrie 2005): 214, <https://www.researchwithrutgers.com/en/publications/what-is-a-brane>.

¹² Becker, Becker, și Schwarz, *String Theory and M-Theory*, 9–12.

¹³ Dawid, „Scientific Realism in the Age of String Theory”.

¹⁴ Becker, Becker, și Schwarz, *String Theory and M-Theory*.

¹⁵ Becker, Becker, și Schwarz, 14–15.

¹⁶ Zwiebach, *A First Course in String Theory*, 376.

¹⁷ Igor R. Klebanov și Juan M. Maldacena, „Solving quantum field theories via curved spacetimes”, *Physics Today* 62, nr. 1 (1 ianuarie 2009): 62 (1): 28–33, <https://doi.org/10.1063/1.3074260>.

¹⁸ Subir Sachdev, „Strange and Stringy”, *Scientific American* 308 (1 decembrie 2012): 308 (44): 44–51, <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0113-44>.

dualității ADS/CFT, o teorie a corzilor cu 10 dimensiuni este echivalentă din punct de vedere observațional cu o teorie gauge în 4 dimensiuni - dualitatea "gauge/gravitație". Din aceste dualități rezultă că teoriile, fiind echivalente, nu sunt fundamentale, și deci nici spațiu-timpul descris nu este fundamental, ci un fenomen emergent.¹⁹ În acest program, teoria gauge și teoria gravitațională sunt limite clasice ale unei teorii cuantice mai cuprinzătoare, unificatoare. Filosofii se întreabă dacă două teorii duale sunt distincte în sens fizic sau doar variante notaționale ale aceleiași teorii.^{20 21}

În 1995, Edward Witten a sugerat că cele cinci familii de teorii din cadrul programului de cercetare al teoriei corzilor sunt cazuri limitative speciale ale unei teorii cu 11 dimensiuni numită teoria-M.²² În 1997, Tom Banks, Willy Fischler, Stephen Shenker și Leonard Susskind au propus un model de matrice pentru teoria M cu 11 dimensiuni, unde limita de energie redusă a acestui model este supergravitația cu unsprezece dimensiuni.²³

Feynman privește teoria cuantică a gravitației ca "doar o altă teorie a câmpului cuantic" cum ar fi electrodinamica cuantică. Diferitele tipuri de particule existente sunt excitații diferite ale aceleiași corzi. Întrucât unul din modurile de oscilare a corzilor este o stare de spin-2 fără masă care se identifică cu gravitonul, teoria corzilor include în mod necesar gravitația cuantică. Teoria corzilor modifică gravitația punctuală a particulelor la distanțe scurte prin schimbul de stări masive ale corzilor.²⁴ În teoriei corzilor, dimensiunea spațiu-timpului nu este o proprietate intrinsecă a teoriei în sine, ci o proprietate a soluției particulare.

În timp ce teoria corzilor nu poate oferi în prezent predicții falsificabile, ea a inspirat, totuși, propuneri noi și imaginative pentru rezolvarea problemelor restante în fizica particulelor și cosmologie. Teoria corzilor din perioada timpurie, când se ocupa de fizica hadronilor, poate explica de ce fermionii vin în trei generații ierarhice, și ratele de amestecare între generațiile de cuarci.²⁵ În a doua perioadă în care a abordat

¹⁹ Tiziana Vistarini, „Emergent Spacetime in String Theory”, 2013, 103.

²⁰ Joseph Polchinski, „Dualities of Fields and Strings”, *arXiv:1412.5704 [hep-th]*, 17 decembrie 2014, <http://arxiv.org/abs/1412.5704>.

²¹ Dean Rickles, „A philosopher looks at string dualities”, *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics* 42 (2011): 42: 54–67, <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2010.12.005>.

²² Michael J. Duff, „The Theory Formerly Known as Strings”, *Scientific American* 278 (1 februarie 1998): 278 (2): 64–9, <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0298-64>.

²³ T. Banks et al., „M theory as a matrix model: A conjecture”, *Physical Review D* 55, nr. 8 (15 aprilie 1997): 55 (8): 5112–5128, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.55.5112>.

²⁴ Richard P Feynman et al., *Feynman Lectures on Gravitation* (Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1995).

²⁵ Jonathan J. Heckman și Cumrun Vafa, „Flavor Hierarchy From F-theory”, *Nuclear Physics B* 837, nr. 1–2 (septembrie 2010): 837 (1): 137–151, <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2010.05.009>.

gravitația cuantică, teoria a abordat paradoxul informațiilor despre gaura neagră, numărarea entropiei corecte a găurilor negre²⁶ și procesele de schimbare a topologiei.²⁷ Descoperirea corespondenței AdS/CFT a condus la o formulare a teoriei corzilor în funcție de teoria câmpului cuantic, mai bine înțeleasă, și a oferit un cadru general pentru rezolvarea paradoxurilor găurilor negre,²⁸ precum cel în cazul radiației Hawkins a găurilor negre (paradoxul informațiilor).²⁹ Prin programul său de cercetare, a condus la multe descoperiri teoretice în matematică și teoria gauge.

Teoria corzilor este considerată a fi un instrument util în investigarea proprietăților teoretice ale termodinamicii găurilor negre,³⁰ respectiv entropia acestora.³¹ Bazele teoretice pentru aceste investigații u luat în considerare cazul unor găuri negre idealizate, cu masa cea mai mică posibilă compatibilă cu o sarcină dată.³² Acest rezultat poate fi generalizat la orice teorie a gravitației,³³ putându-se extinde la găuri negre astrofizice non-extreme.³⁴

În teoria Big Bang, parte a modelului cosmologic predominant pentru univers, expansiunea rapidă inițială a universului este cauzată de o particulă ipotetică numită inflaton. Proprietățile exacte ale acestei particule nu sunt cunoscute. Ele ar trebui să fie derivate dintr-o teorie mai fundamentală, precum teoria corzilor.³⁵ Dezvoltarea acestui subprogram din cadrul programului de cercetare al teorie corzilor este în curs de dezvoltare.³⁶

În teoria branelor, branele D au fost identificate cu soluțiile de supergravitație cu găuri negre. Leonard Susskind a identificat principiul holografic al lui Gerardus 't Hooft cu stări obișnuite ale găurilor negre termice.

²⁶ Andrew Strominger și Cumrun Vafa, „Microscopic origin of the Bekenstein-Hawking entropy”, *Physics Letters B* 379, nr. 1 (27 iunie 1996): 379 (1–4): 99–104, [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(96\)00345-0](https://doi.org/10.1016/0370-2693(96)00345-0).

²⁷ A. Adams et al., „Things Fall Apart: Topology Change from Winding Tachyons”, *Journal of High Energy Physics* 2005, nr. 10 (11 octombrie 2005): (10): 033, <https://doi.org/10.1088/1126-6708/2005/10/033>.

²⁸ Sebastian de Haro et al., „Forty Years of String Theory Reflecting on the Foundations”, *Foundations of Physics* 43, nr. 1 (1 ianuarie 2013): 2, <https://doi.org/10.1007/s10701-012-9691-3>.

²⁹ Leonard Susskind, *The Black Hole War: My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics*, Reprint edition (New York: Back Bay Books, 2009).

³⁰ de Haro et al., „Forty Years of String Theory Reflecting on the Foundations”, 2.

³¹ Yau, *The Shape of Inner Space*, 189.

³² Yau, 192–93.

³³ Andrew Strominger, „Black Hole Entropy from Near-Horizon Microstates”, *Journal of High Energy Physics* 1998, nr. 02 (15 februarie 1998): (2): 009, <https://doi.org/10.1088/1126-6708/1998/02/009>.

³⁴ Alejandra Castro, Alexander Maloney, și Andrew Strominger, „Hidden conformal symmetry of the Kerr black hole”, *Physical Review D* 82, nr. 2 (13 iulie 2010): (2): 024008, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.82.024008>.

³⁵ Becker, Becker, și Schwarz, *String Theory and M-Theory*, 533.

³⁶ Becker, Becker, și Schwarz, 539–43.

Recent, unele experimente din alte domenii, precum fizica materiei condensate, au utilizat rezultate teoretice ale teoriei corzilor.³⁷ Iar inseparabilitatea cuantică în supraconductori se bazează în mare măsură pe ideile dualității și a dimensiunilor spațiale suplimentare dezvoltate în teoria corzilor. Cu ajutorul dualității dintre teoriile gauge 4-dimensiunale și gravitația 5-dimensională, teoreticienii corzilor au prezis valoarea experimentală a entropiei în plasmă, rezultat neobținut prin niciun alt model teoretic, dar acestea nu sunt validări experimentale absolute.^{38 39}

Se speră ca dimensiunile suplimentare să poată fi observate cu ajutorul Hadron Collider (LHC) de la CERN, Geneva, dar o eventuală infirmare nu ar însemna refutarea teoriei.

Pentru mulți cercetători, teoria gauge este considerată drept singura modalitate de a renormaliza relații, iar teoria corzilor singura opțiune de a elimina infinitățile unui program unificator al fizicii cuantice și gravitației. Teoria corzilor a fost coroborată experimental inițial ca teorie din fizica particulelor, dar în dezvoltarea actuală este considerată a fi departe de a putea fi considerată falsificabilă. Continuarea programului se bazează pe încrederea că teoria este cel mai bun candidat pentru un program unificator total. Credibilitatea ei este sporită de interconexiunile create în decursul dezvoltării sale, precum în cazul supersimetriei și al cosmologiei găurilor negre.

Teoria corzilor încă nu are o definiție satisfăcătoare în toate circumstanțele. Teoria apelează la tehnici perturbative,⁴⁰ dar încă nu a clarificat aspectele care țin de determinarea proprietăților universului,⁴¹ astfel încât a atras critici ale unor oameni de știință, punând la îndoială valoarea cercetărilor în această direcție.⁴²

Criticii teoriei corzilor atrag atenția asupra numărului mare de soluții posibile descrise de teoria corzilor. Potrivit lui Woit,

”Posibila existență, de exemplu, a 10500 de stări diferite de vid în teoria supercorzilor, probabil distruge speranța de a folosi teoria pentru a prezice orice. Dacă cineva alege între acest set mare doar acele stări ale căror proprietăți sunt de acord cu observațiile

³⁷ Sachdev, „Strange and Stringy”, 44–51.

³⁸ Richard Dawid, *String Theory and the Scientific Method*, 1 edition (Cambridge: Cambridge University Press, 2013).

³⁹ Paul Verhagen, „Understanding the Theory of Everything: Evaluating Criticism Aimed at String Theory” (Amsterdam University College, 2015), <http://www.uva.nl/binaries/content/documents/personalpages/h/a/s.deharo/en/tab-three/tab-three/cpitem%5B8%5D/asset>.

⁴⁰ Becker, Becker, și Schwarz, *String Theory and M-Theory*, 8.

⁴¹ Becker, Becker, și Schwarz, 13–14.

⁴² A. Zee, *Quantum Field Theory in a Nutshell, 2nd Edition*, 2 edition (Princeton, N.J.: Princeton University Press, 2010).

experimentale actuale, este probabil că va exista încă un număr atât de mare încât se poate obține oricare valoare dorită pentru rezultatele oricărei noi observații.”⁴³

Adepții teoriei susțin că acest lucru poate fi un avantaj, permițând o explicație antropică naturală a valorilor observate ale constantelor fizice.⁴⁴

O altă critică se focalizează pe dependența teoriei de fundal, spre deosebire de relativitatea generală. Lee Smolin susține că aceasta este principala slăbiciune a teoriei corzilor ca o teorie a gravitației cuantice.⁴⁵

Soluțiile teoriei nu sunt unice, și nu există niciun mecanism perturbativ pentru a selecta o soluție particulară sau pentru a alege adevăratul vid. Astfel încât formularea perturbativă a teoriei corzilor își pierde puterea predictivă. De asemenea, nu există niciun mecanism perturbativ pentru a selecta soluții care să admită spectre de energie scăzută care nu sunt supersimetrice.⁴⁶

Paul Verhagen se întreabă cum ar trebui să evaluăm teoria corzilor; poate o teorie care are dificultăți considerabile cu verificarea experimentală și să fie clasificată ca știință? pentru a răspunde la această întrebare trebuie să analizăm originile diferitelor concepte folosite în teorie, să evaluăm necesitatea unei mari teorii unificate, și să ne concentrăm pe evaluarea situației ei științifice. Unii susțin că teoria corzilor a eșuat, în timp ce alții evidențiază progresele sale teoretice. Există o "ruptură meta-paradigmatică" între experimențiști și teoreticieni în acest sens.⁴⁷

Chalmers consideră că o teorie trebuie să fie falsificabilă în sensul lui Popper⁴⁸ pentru a fi științifică: "Dacă o afirmație este nediferențiată, atunci lumea poate avea orice proprietăți și poate să se comporte în orice fel, fără a intra în conflict cu declarația."⁴⁹ În acest sens, teoria corzilor este considerată ca nefalsificabilă.⁵⁰ Tehnologia actuală nu este suficient de precisă pentru a elabora experimente care să verifice teoria corzilor. Dar teoria este "potențial" falsificabilă; face anumite previziuni, precum existența unor dimensiuni suplimentare, dar acestea nu pot fi verificate, cel

⁴³ Peter Woit, *Not Even Wrong: The Failure of String Theory and the Search for Unity in Physical Law*, Reprint edition (Basic Books, 2007), 242.

⁴⁴ Woit, 242.

⁴⁵ Lee Smolin, *The Trouble With Physics: The Rise of String Theory, The Fall of a Science, and What Comes Next*, Reprint edition (Boston u.a: Mariner Books, 2007), 184.

⁴⁶ Feynman et al., *Feynman Lectures on Gravitation*.

⁴⁷ Verhagen, „Understanding the Theory of Everything: Evaluating Criticism Aimed at String Theory”.

⁴⁸ Karl Popper, *Conjectures and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge*, 2nd edition (London ; New York: Routledge, 2002).

⁴⁹ Alan F. Chalmers, *What Is This Thing Called Science?*, 3 edition (Indianapolis: Hackett Publishing Co., 1999), 63.

⁵⁰ H. Georgi și Paul Davies, *Grand Unified Theories, in The New Physics* (Cambridge University Press, 1992).

puțin deocamdată. Și încă nu au fost elaborate toate consecințele matematice ale axiomelor pentru a detecta eventuale conflicte cu realitatea observată. Dar se fac eforturi în această direcție, și pentru partea experimentală și pentru cea teoretică.

Fizicienii adepți ai teoriei corzilor sunt acuzați că nu țin seama de testabilitatea empirică și înlocuiesc acest criteriu cu argumente matematice. Unele din întrebările fizicienilor și filosofilor sunt:

1. Este necesar ca o teorie să fie testabilă, sau sunt suficiente experimentele mentale?
2. Este necesar ca o teorie să facă predicții verificabile, sau este suficientă o testabilitate indirectă?
3. teorie fără predicții , doar distribuții de probabilități, este considerată testabilă?
4. Testele trebuie să fie neapărat empirice, sau verificările de consistență matematică pot fi considerate și ele teste?
5. Dacă din testele mentale prin reducere la absurd se obțin rezultate contradictorii sau inacceptabile, ce valoare au aceste teste?
6. Când se poate solicita testabilitatea? E valabilă posibilitatea unei testări viitoare?
7. Cât de importantă este testabilitatea în raport cu alte deziderate epistemice? O teorie ușor de testat dar cu o valoare explicativă scăzută este preferată față de o teorie netestabilă dar cu o putere explicativă mai mare? Dar dacă teoria testabilă este prea complicată și cea netestabilă este simplă și elegantă?
8. Predicțiile noilor fenomene sunt mai importante decât pre- sau retrodicțiile fenomenelor deja cunoscute?⁵¹

Reiner Hedrich sugerează⁵² că insuccesul actual al teoriei corzilor s-ar putea datora aparatului matematic greșit ales, folosind matematica continuumului. Este posibil ca atunci când teoria își va găsi principiul fundamental, aceasta ar putea conduce la o bază matematică mai adecvată. O formulare independentă de fundal și principiul holografic ar putea ajuta euristic în găsirea acestui principiu. Dar e

⁵¹ Helge Kragh, „Fundamental Theories and Epistemic Shifts: Can History of Science Serve as a Guide?”, *arXiv:1702.05648 [physics]*, 18 februarie 2017, <http://arxiv.org/abs/1702.05648>.

⁵² Reiner Hedrich, „The Internal and External Problems of String Theory: A Philosophical View”, *Journal for General Philosophy of Science / Zeitschrift für Allgemeine Wissenschaftstheorie* 38, nr. 2 (2006): 261–278.

posibil ca principiul să nu fie găsit niciodată, eventual datorită ipotezelor de bază greșite.

În prezent, teoria corzilor este programul de cercetare dominant în fizica teoretică a energiei înalte,⁵³ considerată de unii oameni de știință ca fără alternative viabile.⁵⁴ Peter Woit consideră acest statut al teoriei ca nesănătos și în detrimentul viitorului fizicii fundamentale, popularitatea ei datorându-se în mare parte structurii financiare a mediului academic și concurenței acerbe a resurselor limitate.⁵⁵ Roger Penrose exprimă opinii similare, afirmând: "Competiția adesea frenetică pe care această ușurință de comunicare o naște duce la efecte de bandwagon, unde cercetătorii se tem că vor rămâne în urmă dacă nu se vor alătura."⁵⁶

Pozitiviști logici au considerat că metoda științifică înseamnă deducerea modelelor de natură din observații. Teoria corzilor s-a dezvoltat inițial pe baza unui fapt observat, pantele lui Regge, care în prezent nu se mai consideră ca fiind explicate de această teorie. Iar teoria nu a fost până în prezent confirmată prin niciun experiment sau observație empirică. Dar a continuat să se dezvolte, sesținută de credința multor fizicieni că este mult mai bună decât teoria câmpului cuantic pentru gravitația cuantică, și în speranța că va ajuta la unificarea gravitației cu celelalte fore fundamentale. Cei mai mulți adepți par să fie complet indiferenți la experimente și observații, fiind mai degrabă preocupați de "eleganța" formulării matematice a teoriei.⁵⁷ Din această cauză, o reconciliere între teoria corzilor și pozitiviștii logici pare imposibilă.⁵⁸

Richard Dawid susține că teoria corzilor se bazează pe observații, dar problema ei ar fi imensa "distanță teoretică" între fenomenele observabile și conceptele științifice. Unii cercetători susțin că principiul subdeterminării empirice a teoriilor științifice nu admite că această "distanță teoretică" poate fi făcută să permită afirmații fiabile despre natură. Pentru aceasta, Dawid consideră că principiul subdeterminării trebuie înlocuit de argumentele care să susțină teoria corzilor. Problema acestei teorii este, după Dawid, arbitraritatea în alegerea principiilor sale fundamentale. Teoria are un anumit set de postulate fizice, dar există o eroziune continuă a acestor postulate care urmează o cale liniară determinată în mod unic. Astfel, Dawid afirmă că

⁵³ Roger Penrose, *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*, Reprint edition (New York: Vintage, 2007), 1017.

⁵⁴ Woit, *Not Even Wrong*, cap. 16.

⁵⁵ Woit, 239.

⁵⁶ Penrose, *The Road to Reality*, 1018.

⁵⁷ F. David Peat, *Superstrings and the Search for the Theory of Everything*, 1 edition (Place of publication not identified: McGraw-Hill Education, 1989), 276.

⁵⁸ Verhagen, „Understanding the Theory of Everything: Evaluating Criticism Aimed at String Theory”.

dezacordul dintre teoreticienii corzilor și fizicienii fenomenologici cu privire la statutul corzilor dispare datorită unei schimbări dramatice a caracteristicilor teoriei științifice: vechea concepție de subdeterminare a teoriilor științifice din fizica modernă a particulelor pierde treptat teren în fața principiului unicității teoretice. Teoria corzilor ar induce o nouă înțelegere a ceea ce se poate numi o declarație științifică despre natură: pretenția de unicitate teoretică este suficientă pentru adoptarea unei noi teorii științifice.⁵⁹

În 1995, din unificarea teoriilor corzilor a luat naștere cel mai pretențios program de cercetare în gravitație, unificator, teoria M 11-dimensională,⁶⁰ cu scopul de a unifica gravitația cu toate celelalte forțe fundamentale din fizică.

⁵⁹ Dawid, „Scientific Realism in the Age of String Theory”.

⁶⁰ Duff, „The Theory Formerly Known as Strings”, 278 (2): 64–9.

Bibliografie

- Adams, A., X. Liu, J. McGreevy, A. Saltman, și E. Silverstein. „Things Fall Apart: Topology Change from Winding Tachyons”. *Journal of High Energy Physics* 2005, nr. 10 (11 octombrie 2005): 033–033. <https://doi.org/10.1088/1126-6708/2005/10/033>.
- Banks, T., W. Fischler, S. H. Shenker, și L. Susskind. „M theory as a matrix model: A conjecture”. *Physical Review D* 55, nr. 8 (15 aprilie 1997): 5112–28. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.55.5112>.
- Becker, Katrin, Melanie Becker, și John H. Schwarz. *String Theory and M-Theory: A Modern Introduction*. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 2007.
- Capelli, A. „The Birth of String Theory Edited by Andrea Cappelli”. Cambridge Core, aprilie 2012. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511977725>.
- Castro, Alejandra, Alexander Maloney, și Andrew Strominger. „Hidden conformal symmetry of the Kerr black hole”. *Physical Review D* 82, nr. 2 (13 iulie 2010): 024008. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.82.024008>.
- Chalmers, Alan F. *What Is This Thing Called Science?* 3 edition. Indianapolis: Hackett Publishing Co., 1999.
- Dawid, Richard. „Scientific Realism in the Age of String Theory”. *Physics and Philosophy*, 2007.
- . *String Theory and the Scientific Method*. 1 edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- Duff, Michael J. „The Theory Formerly Known as Strings”. *Scientific American* 278 (1 februarie 1998): 64–69. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0298-64>.
- Feynman, Richard P, Fernando B Morinigo, William G Wagner, și Brian Hatfield. *Feynman Lectures on Gravitation*. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1995.
- Georgi, H., și Paul Davies. *Grand Unified Theories, in The New Physics*. Cambridge University Press, 1992.
- Haro, Sebastian de, Dennis Dieks, Gerard 't Hooft, și Erik Verlinde. „Forty Years of String Theory Reflecting on the Foundations”. *Foundations of Physics* 43, nr. 1 (1 ianuarie 2013): 1–7. <https://doi.org/10.1007/s10701-012-9691-3>.
- Heckman, Jonathan J., și Cumrun Vafa. „Flavor Hierarchy From F-theory”. *Nuclear Physics B* 837, nr. 1–2 (septembrie 2010): 137–51. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2010.05.009>.
- Hedrich, Reiner. „The Internal and External Problems of String Theory: A Philosophical View”. *Journal for General Philosophy of Science / Zeitschrift für Allgemeine Wissenschaftstheorie* 38, nr. 2 (2006): 261–278.
- Klebanov, Igor R., și Juan M. Maldacena. „Solving quantum field theories via curved spacetimes”. *Physics Today* 62, nr. 1 (1 ianuarie 2009): 28–33. <https://doi.org/10.1063/1.3074260>.
- Kragh, Helge. „Fundamental Theories and Epistemic Shifts: Can History of Science Serve as a Guide?” *arXiv:1702.05648 [physics]*, 18 februarie 2017. <http://arxiv.org/abs/1702.05648>.
- Lam, Vincent. „Quantum Structure and Spacetime.” *Metaphysics in Contemporary Physics*, 1 ianuarie 2016, 81–99. https://doi.org/10.1163/9789004310827_005.
- Moore, Gregory. „What Is... a Brane?” *Notices of the American Mathematical Society* 52, nr. 2 (28 noiembrie 2005): 214–15. <https://www.researchwithrutgers.com/en/publications/what-is-a-brane>.
- Peat, F. David. *Superstrings and the Search for the Theory of Everything*. 1 edition. Place of publication not identified: McGraw-Hill Education, 1989.

- Penrose, Roger. *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*. Reprint edition. New York: Vintage, 2007.
- Polchinski, Joseph. „Dualities of Fields and Strings”. *arXiv:1412.5704 [hep-th]*, 17 decembrie 2014. <http://arxiv.org/abs/1412.5704>.
- Popper, Karl. *Conjectures and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge*. 2nd edition. London ; New York: Routledge, 2002.
- Randall, Lisa, și Raman Sundrum. „An Alternative to Compactification”. *Physical Review Letters* 83, nr. 23 (6 decembrie 1999): 4690–93. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.4690>.
- Rickles, Dean. „A philosopher looks at string dualities”. *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics* 42 (2011): 54–67. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2010.12.005>.
- Sachdev, Subir. „Strange and Stringy”. *Scientific American* 308 (1 decembrie 2012): 44–51. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0113-44>.
- Smolin, Lee. *The Trouble With Physics: The Rise of String Theory, The Fall of a Science, and What Comes Next*. Reprint edition. Boston u.a: Mariner Books, 2007.
- Strominger, Andrew. „Black Hole Entropy from Near-Horizon Microstates”. *Journal of High Energy Physics* 1998, nr. 02 (15 februarie 1998): 009–009. <https://doi.org/10.1088/1126-6708/1998/02/009>.
- Strominger, Andrew, și Cumrun Vafa. „Microscopic origin of the Bekenstein-Hawking entropy”. *Physics Letters B* 379, nr. 1 (27 iunie 1996): 99–104. [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(96\)00345-0](https://doi.org/10.1016/0370-2693(96)00345-0).
- Susskind, Leonard. *The Black Hole War: My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics*. Reprint edition. New York: Back Bay Books, 2009.
- Verhagen, Paul. „Understanding the Theory of Everything: Evaluating Criticism Aimed at String Theory”. Amsterdam University College, 2015. <http://www.uva.nl/binaries/content/documents/personalpages/h/a/s.deharo/en/tab-three/tab-three/cpitem%5B8%5D/asset>.
- Vistarini, Tiziana. „Emergent Spacetime in String Theory”, 2013, 103.
- Woit, Peter. *Not Even Wrong: The Failure of String Theory and the Search for Unity in Physical Law*. Reprint edition. Basic Books, 2007.
- Yau, Shing-Tung. *The Shape of Inner Space*. Reprint edition. Basic Books, 2012.
- Zee, A. *Quantum Field Theory in a Nutshell, 2nd Edition*. 2 edition. Princeton, N.J: Princeton University Press, 2010.
- Zwiebach, Barton. *A First Course in String Theory*. 2 edition. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 2009.