

UNIFICARE ȘI EXPLICAȚIE ÎN TEORIILE KALUZA-KLEIN

Ioan Lucian MUNTEAN^{*}

Universitatea California, San Diego

Unifying distinct domains of phenomena is one of the most important non-empirical virtues of scientific theories. What counts as a unification and what makes it important are philosophically controversial and attention to important historical episodes is needed. I tackle one of the most significant episodes in the history of physics, an episode that oddly given how important the theory is now has escaped historical and philosophical investigation: an early attempt to unify gravity and electromagnetism within a five-dimensional spacetime by Kaluza (1921) and Klein (1926). In these two concrete cases I show that (a) a novel type of unification obtains, and (b) that the more unified the theory became, the more explanatory it was. Finally, I stress the importance of the Kaluza-Klein type of unification for recent attempts to explore extra-dimensions of spacetime (related mainly to String Theory).

Keywords: ad-hocness, explanation, Kaluza, Klein, hyperspace, String Theory, unification.

O cercetare atentă asupra istoriei filosofiei ar arăta că idealul unificării cunoașterii poate fi regăsit în aproape orice epocă istorică. Asemeni filosofiei, știința a năzuit să ofere o descriere unitară și completă a lumii, cu o maximă putere de explicație. Ideea "unității științei" este prezentă la autori cu o mare influență asupra evoluției științei (Fr. Bacon, Leibniz, Kant, *i.a.*), precum și la oameni de știință precum W. Whewell, E. Mach, H. Poincaré etc. Ideea unității tuturor științelor poate părea un ideal prea îndepărtat în contextul actual în care asistăm la ramificarea și diversificarea disciplinelor în cadrul tuturor științelor. În materialul de față am în vedere un scop mai restrâns,

^{*} Doresc să aduc mulțumiri lui William Bechtel, Craig Callender, Nancy Cartwright, Valentin Cioveie, Ken Intrilligator, Chris Smeenk, Christian Wüthrich, precum și referentului anonim al *Revistei de Filosofie Analitică* pentru observațiile ce m-au ajutat substanțial în elaborarea prezentei lucrări precum și a celor două materiale publicate în limba engleză (vezi lista de referințe bibliografice). Adresă de email: imuntean@ucsd.edu

anume unificarea mai multor teorii științifice în cadrul uneia și aceeași științe. Nu doresc să adresez aici întrebarea mai generală dacă idealul unificării “locale” în cadrul unei științe poate fi corelat sau legat la nivel ideatic cu idealul unității globale a tuturor științelor. În fapt întrebarea pe care o propun aici: “Cum operează unificarea în cazuri concrete de zi cu zi ale practicii științifice?” nu este direct legată de problema unității științelor. De asemenea, din rațiuni legate de spațiu nu voi adresa problema unificării științifice decât în cazul fizicii contemporane. Discuțiile legate de unificarea în biologie, chimie sau științele sociale trebuie tratate separat în situații concrete de practicare a științelor respective.

Istoria fizicii poate fi citită ca o succesiune de unificări teoretice de succes: Newton a unificat mecanica corpurilor cerești cu cea a corpurilor terestre, Maxwell a unificat electricitatea și magnetismul, Einstein a unificat electromagnetismul și dinamica relativistă, E. Glashow, St. Weinberg și A. Salam au unificat forța nucleară slabă cu cea electromagnetică etc.¹ În fizica din zilele noastre încercările de unificare pot fi împărțite în două categorii. Pe de o parte avem unificarea mai multor interacțiuni în una și aceeași teorie. Astfel, așa-zisa “teorie a marii unificări” constă în unificarea tuturor interacțiunilor cunoscute. Ca urmare a adoptării ipotezei “marii unificări”, forțele de interacțiune pot fi unificate în una și aceeași descriere. Pe de altă parte, există mai multe încercări de a unifica mecanica cuantică ce descrie dinamica particulelor elementare cu teoria câmpului ce descrie interacțiunile între mai multe câmpuri. Toate câmpurile cunoscute pot fi cuantizate, cu excepția interacțiunii gravitaționale. Dacă gravitația nu poate fi cuantizată, se pune evident întrebarea în ce măsură există o unificare a tuturor câmpurilor de interacțiune.² Programul de unificare discutat în materialul de față face din prima categorie (cu toate că pentru un scurt interval de timp speranțele au fost mai îndrăznețe: Klein nutrit speranța că teoria poate realiza o unificare și în al doilea sens). Abia peste jumătate de secol programul unificațional datorat lui Kaluza și Klein a fost din nou aduse în scenă iar

¹ Pentru mai multe detalii vezi în special: Margaret Morrison, *Unifying Scientific Theories: Physical Concepts and Mathematical Structures*, Cambridge University Press, 2000, o lucrare recentă ce analizează mai multe cazuri de unificare.

² „Poate fi cuantizată gravitația?” este o întrebare perfect legitimă. Vezi Christian Wüthrich, “To Quantize Or Not to Quantize: Fact and Folklore in Quantum Gravity”, în *Philosophy of Science* 72 (2005); C. Callender și N. Huggett, “Why Quantize Gravity (Or any Other Field for that Matter)?” în *Philosophy of Science* 68, nr. 3 (2001).

speranțele față de o unificare între cuantică și teoria câmpului, reinterate încă o dată în cadrul teoriei *string*³.

În fizica teoretică actuală unificarea este folosită îndeobște în contextul teoriei stringurilor și al diferitelor programe de cuantizare a gravitației, dar totodată în cadrul modelului standard al particulelor elementare. Este firesc ca filosofii științei să analizeze în mod detaliat astfel de demersuri unificatorii cu caracter general din perspectiva puterii de unificare pe care o au teoriile științifice. Dar din păcate literatura filosofică în jurul unificării în teoria string este destul de săracă. Nu voi insista în materialul de față pe teoria de tip "string", deși vreau să precizez că analiza de față este relevantă pentru orice încercare filosofică care abordează teoria string. Există un scepticism filosofic legat de unificarea științifică, la fel cum există un optimism "cumpătat" din partea filosofilor față de orice progres științific. Mai toate cazurile reușite de unificare au fost puse la îndoială de curentul care promovează "pluralitatea științifică" (P. Suppes, J. Hacking, P. Teller, N. Cartwright). Fără a încerca să intru într-o polemică legată de unitatea științei în general, mă voi concentra asupra puterii de unificare a teoriilor în cadrul fizicii, mai precis a celor din clasa teoriei generale a relativității bazate pe dimensiuni spațiale suplimentare. Aici voi discuta cel mai simplu model dezvoltat la începutul secolului trecut de către Th. Kaluza (1921) și O. Klein (1926), încercând astfel să aduc un element nou în discuția despre unificarea științifică în cazul teoriilor fizice.

Cele două interacțiuni cunoscute la începutul secolului trecut erau interacțiunea electromagnetică și cea gravitațională. Demersurile întru unificarea celor două câmpuri de interacțiune au marcat primele decenii pentru ca apoi, după descoperirea interacțiunii slabe, ele să cunoască o perioadă de dizgrație alimentată de scepticismul față de teoria clasică a câmpului precum și de noile progrese în domeniul formalismului cuantic, considerat de mulți fizicieni drept singurul apt să descrie "materia" (particulele elementare în speță). Teoria clasică a câmpului însă a permis, cel puțin în primele ei formulări, mai multe demersuri unificatoare încurajatoare.

Fizicianul teoretician poate avea o atitudine entuziastă în ceea ce privește unificarea.⁴ Alții o pot privi drept un ideal care nu poate fi realizat

³ Am preferat să nu traduc termenul din engleză "string". Posibile traduceri ar fi "teoria stringurilor" sau "teoria vibrațiilor". "Teoria corzilor" nu este deloc o alegere fericită.

⁴ Vezi de pildă S. Weinberg, *Dreams of a Final Theory: The Scientist's Search for the Ultimate Laws of Nature* (Vintage, 1992).; S. Weinberg, "Viewpoints on String Theory: The

decât în cazuri particulare—“un pod prea îndepărtat” pentru evoluția de zi cu zi a fizicii teoretice, sau mai rău, ca pe o idee irealizabilă ce consumă fonduri și resurse fără a produce nimic concret.⁵ Și filosofii, din așa numita orientare pluralistă au atacat unificarea din mai multe direcții.⁶

§ 1. “Unificarea științifică” într-o abordare filosofică

Dacă unificarea nu face parte din practica de zi cu zi a fizicianului teoretician, în ce măsură este justificată o analiză filosofică a unificării? Am încercat să sugerez că fizica de la începutul secolului al XX-lea suferea de un anumit dualism între electromagnetism și gravitate, dar și între materie și câmp. Tema dualității fizicii este foarte des popularizată în contextul mecanicii cuantice.⁷ Unificarea în fizică este încercarea de a elimina pe cât posibil “dualitatea” din descrierea pe care fizica o oferă lumii. Avem de pildă două teorii T_1 și T_2 pe care, aparent le considerăm independente deoarece ele au formalisme diferite și descriu aspecte diferite ale realității. Unificarea propune o nouă teorie în care toate fenomenele descrise de T_1 și separat de T_2 vor fi explicate sau prezise de același formalism. Mult-râvnita teorie “unificatorie” T este de multe ori mai simplă, mai coerentă, mai puțin ad-hoc și, dacă totul merge așa cum ne așteptăm, mai explicativă decât teoriile T_1 și

Elegant Universe” NOVA, PBS, <<http://www.pbs.org/wgbh/nova/elegant/view-weinberg.html>> (accesat la 2/7/2008). Titlul popularei cărți a lui Weinberg sugerează caracterul ideal, dificil de atins al unificării. Visul lui Einstein, precum și visul lui Weinberg, sunt idealuri unificatorii bazate mai mult sau mai puțin pe un criteriu estetic sau subiectiv. Aici îmi propun o abordare filosofică bazată pe analiza unui caz concret de unificare. Dacă argumentul meu este solid, teoriile Kaluza-Klein sunt un exemplu reușit de unificare în fizică.

⁵ Vezi mai ales atacurile lui L. Smolin și P. Woit la adresa teoriei string, dar care pot fi aplicate în general la alte teorii unificatorii, inclusiv teoria Kaluza-Klein. Lee Smolin, *The Trouble with Physics: The Rise of String Theory, the Fall of a Science, and what Comes Next* (Boston, New York: Houghton Mifflin, 2006); Peter Woit, *Not Even Wrong: The Failure of String Theory and the Search for Unity in Physical Law* (New York: Basic Books, 2006); Roger Penrose, *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*, 1st American ed. (New York: A.A. Knopf, 2005).

⁶ Vezi de ex. P. Gallison, N. Cartwright, I. Hacking etc. O dezbatere interesantă poate fi găsită în P. Kitcher, “Unification as a Regulative Ideal,” *Perspectives on Science* 7 (1999), 337-348 și în materialele însoțitoare.

⁷ Unul dintre autorii care a fost influent în România în anii 1970 este E. Schrödinger, care a analizat chestiunea dualității undă-corpusul. Tendința generală a fost să se trateze gravitația ca pe o altă forță diferită de toate celelalte trei forțe cunoscute.

T₂ luate separat.⁸ În materialul de față voi încerca să dovedesc într-o situație concretă cum e posibilă această operație de unificare. Despre relevanța ei filosofică sunt multe lucruri de spus: dacă unificarea funcționează așa cum ne așteptăm, știința ne apropie de adevăr eliminând înșelătoarele ale diferenței dintre T₁ și T₂. Teoria T este mai reală, în sensul realismului științific decât predecesoarele ei, T₁ și T₂. De asemenea, ne dorim ca T să explice mai mult decât T₁ și T₂. Alte elemente necesare unei analize a teoriei unificatorii T ar fi: confirmarea experimentală și stabilitatea teoriei unificatorii. Este teoria T mai ușor sau mai greu de confirmat decât T₁ și T₂? Este T mai stabilă decât T₁ și T₂? Voi încerca să sugerez câteva răspunsuri la astfel de întrebări în cazul concret al teoriilor Kaluza-Klein.

Fizicienii încearcă să împlinescă un ideal în care teoriile fizice sunt simple, unificate, lipsite de ipoteze ad-hoc, coerente, consistente, etc. și în cele din urmă "frumoase".⁹ Adecvarea la datele experimentale nu este unicul criteriu de validare a unei teorii științifice. În această listă lungă de virtuți non-empirice ale teoriilor științifice, "unificarea" este îndeobște pusă la loc de seamă. În filosofia științei, termenul de "putere de unificare a unei teorii" este destul de larg răspândit mai ales în contextul filosofiei fizicii.

Spre deosebire de termeni precum "explicație", "predicție" sau "realism", "unificarea științifică" nu constituie o temă de sine-stătătoare. În ultimele decenii, unificarea nu a mai fost discutată în filosofie în sensul folosit în anii '30 de R. Carnap și O. Neurath pentru care unificarea avea un sens legat mai ales de utilizarea unui limbaj comun și al raționalității științifice. Unificarea ca unitate a științelor implica pentru Neurath de pildă, colaborarea științifică la nivel internațional între comunitățile științifice. Mă voi concentra acum pe un sens al unificării foarte popular după declinul modelului nomologico-deductiv ce a avut loc în deceniile șapte și opt al secolului trecut. Care sunt așadar abordările filosofice cele mai populare în ultimul timp? Voi începe discuția cu grupul filosofilor care au manifestat entuziasm în ceea ce privește relația dintre unificare și explicație științifică, dar și față de relația între unificare și realismul științific.

M. Friedman și Ph. Kitcher. Conform modelului lui M. Friedman (1974) și mai apoi al lui Ph. Kitcher (1986-1989), unificarea a două teorii științifice este intim legată de explicație. O teorie care poate *explica* o clasă mai largă de

⁸ Îmi permit aici o licență: voi numi teoria T, teorie unificatorie și teoriile T₁ și T₂ teorii unificate.

⁹ Mai mulți autori au sugerat că "frumusețea" este un criteriu de alegere a teoriilor științifice. Vezi James W. McAllister, *Beauty & Revolution in Science*, Cornell University Press, 1999.

fenomene decât altă teorie este în aceeași măsură o teorie care *unifică*. Modelul dominant datorat lui Friedman (1974) (reluat de Kitcher, 1981) este centrat pe legătura amintită mai sus. “Aceasta este proprietatea esențială a teoriilor științifice pe care o căutăm; ea este esența explicației științifice: știința sporește înțelegerea noastră asupra lumii prin reducerea numărului total de fenomene independente pe care le acceptăm drept ultime sau date (o lume cu mai puține fenomene independente este, *ceteris paribus*, mai inteligibilă decât o lume cu mai multe fenomene independente)”.¹⁰ O propoziție S poate reduce un set de propoziții Δ dacă $card_K(\Delta \cup S) < card_K(\Delta)$ unde $card$ este cardinalitatea unei partiții a domeniului cunoașterii K (o partiție $con_K(S)$ este o mulțime de propoziții logic echivalente cu S dar care pot fi acceptate independent de S). Definiția explicației dată de Friedman este:

(D-1) O propoziție S_1 explică o propoziție S_2 dacă:

- a) $S_2 \in con_K(S_1)$ și
- b) S_1 reduce $con_K(S_1)$.

Legătura între explicație și unificare este destul de clară în partea b) a definiției de mai sus.

Kitcher a suspectat de la bun început importanța *numărului* de fapte independente pe care o teorie științifică le reduce. În “Explanation, conjunction and unification” (1976), Kitcher critică modelul lui Friedman și oferă contraexemple la teoria lui Friedman. Soluția sa este folosirea tipurilor de legi ca element redus de o teorie care unifică, nu a numărului de fapte “brute”.¹¹ În “Explanatory unification” (1981) Kitcher propune propriul său model în care *tipurile de argumente*¹² sunt elementele unificate de teoria științifică. Explicația științifică este o metodă de a răspunde la întrebări de forma: “de ce X ?”. “Știința îmbogățește înțelegerea pe care o avem asupra lumii, indicând cum putem deriva reprezentarea mai multor fenomene folosind repetat aceleași moduri (*patterns*) de derivare, și prin aceasta ne învață cum să reducem numărul tipurilor de fapte pe care le acceptăm ca

¹⁰ Michael Friedman, “Explanation and Scientific Understanding” în *Journal of Philosophy* 71, no. 17 (Ianuarie 1974), p. 15.

¹¹ Philip Kitcher, “Explanation, Conjunction, and Unification” în *Journal of Philosophy* 73, no. 22 (Aprilie, 1976), p. 212.

¹² Philip Kitcher, “Explanatory Unification” în *Philosophy of Science* 48 (Decembrie, 1981), p. 515.

ultime (sau brute)".¹³ În *Principia Mathematica*, Newton folosește tipuri de argumente aplicate gravității. Ceea ce a urmărit Newton a fost să generalizeze aceste tipuri de argumente și la alte forțe. Din punct de vedere schematic argumentele lui Kitcher conțin structura argumentelor precum și reguli de înlocuire a termenilor logici prin termeni fizici precum masă, impuls. Alți termeni pot rămâne în forma lor interpretată fără a fi înlocuiți. Pentru Kitcher, oamenii de știință folosesc argumente "similare" în domenii diferite ale cunoașterii. Un model (*pattern*) de argument are o anumită "stringență" în funcție de constrângerea pe care o impune asupra instanțierii termenilor non-logici. Puterea de unificare a unei baze B_i este proporțională cu numărul concluziilor deductibile din aceasta, adică este direct proporțională cu stringența argumentelor ce aparțin bazei B_i și este invers proporțională cu numărul membrilor bazei.¹⁴

În ultimii ani, necesitatea unei legături între explicație și unificare a fost pusă sub semnul întrebării mai ales de către Margaret Morrison și Jakko Hintikka.¹⁵ Dacă unificarea nu este legată necesarmente de explicație, se poate formula o teorie a unificării *per se*?

Lipsa unui model universal al unificării teoriilor științifice nu este doar un inconvenient, ci și un avantaj. În multe situații analiza cazurilor specifice ne poate furniza date neașteptate legate de unificare. În materialul de față îmi propun să explorez nu doar capacitatea de unificare și explicație a modelului datorat lui Theodor Kaluza și Oskar Klein, ci și o nouă problemă legată de "prețul unificării științifice". Modelul propus de cei doi autori în a treia decadă a secolului trecut se înscrie în mod explicit pe linia unificării teoriei relativității și teoriei electromagnetismului. Vreau să argumentez că în acest caz există o relație destul de puternică între explicație și puterea de unificare, însă cu prețul pe care îl voi detalia în cele ce urmează. Ideea mea nu este în contradicție directă cu tezele lui M. Morrison. Enunț aici tezele lui Morrison doar cu intenția de a accentua compatibilitatea între demersul meu și cel prezent în recenta ei carte:¹⁶

¹³ Philip Kitcher, "Explanatory Unification and the Causal Structure of the World" în *Scientific Explanation*, Wesley Salmon, P. Kitcher (editori), Vol. XIII, Minneapolis: University of Minnesota Press, 1989), p. 432.

¹⁴ Ibid., p. 520.

¹⁵ Ilpo Halonen și Jaakko Hintikka, "Unification – it's Magnificent but is it Explanation?" în *Synthese* 120, no. 1 (1999) .

¹⁶ Margaret Morrison, *Unifying Scientific Theories: Physical Concepts and Mathematical Structures*, Oxford University Press, 2000, p. 4.

(T-1) Puterea de unificare și cea explicativă nu sunt corelate în mod necesar (contra a ceea ce au susținut Kitcher și Friedman).

(T-2) În foarte puține cazuri unificarea are o consecință metafizică sau ontologică privind unitatea fenomenelor în natură;

(T-3) Unificarea presupune o structură matematică sau un proces de matematizare a fenomenelor;

(T-4) Unificarea presupune un concept sau un parametru drept constituent a unei structuri teoretice care reprezintă sau facilitează mecanismul de unificare.

Un exemplu de caz izbutit de unificare a două teorii este oferit de teoria lui Maxwell, cel care a reușit să descrie prin același set de ecuații electricitatea și magnetismul. Ideea lui Maxwell este reflectată în modelul Kaluza-Klein, însă în cazul noului model presupuzițiile sunt de natură geometrică și se referă direct la structura spațiului și timpului, mai precis la dimensionalitatea și topologia acestuia.

Încă de la început (pe la mijlocul deceniului al optulea), teoria "string" a fost în mare parte dominată de ideea de unificare: unificarea forțelor cunoscute în natură și unificarea sub același formalism al teoriei gravitației și a mecanicii cuantice. Din punct de vedere conceptual și structural, modelul Kaluza-Klein stă la baza teoriei string, mai ales având în vedere forma sa generalizată pentru câmpurile de tip Yang-Mills (ce conțin și alte interacțiuni decât interacțiunea electromagnetică) și extrapolată la un număr de dimensiuni mai mare decât cinci (tipic, zece sau unsprezece dimensiuni în total). În materialul de față mă voi concentra exclusiv asupra formei inițiale a proiectului, anterioară descoperirii altor forțe la mijlocul deceniului al patrulea al secolului trecut.¹⁷ Voi trata modelul Kaluza-Klein ca pe o paradigmă unificatorie care poate fi aplicată în primul rând teoriei gravitației și teoriei electromagnetice, dar care poate fi generalizată apoi la unificarea teoriei gravitației cu orice teorie de tip Yang-Mills. Caracterul unificatoriu al

¹⁷ Abundența de materiale destinate modelului Kaluza Klein după anii 1980 se datorează unui articol absolut esențial pentru dezvoltarea ulterioară a teoriei stringurilor, E. Cremmer, B. Julia și J. Scherk, "Supergravity Theory in Eleven-Dimensions," în *Physics Letters B* 76 (1981). Modelul Kaluza-Klein precum și presupuziții de natură topologică au permis extinderea Kaluza-Klein la unsprezece dimensiuni și descrierea altor interacțiuni decât cea electromagnetică. O mare parte a discuției de natură filosofică a presupuzițiilor modelului teoriei se pot extinde în cazul teoriei stringurilor, dar nu constituie subiectul materialului de față.

acestui model timpuriu dar și puterea sa de explicație sunt subiecte ce vor fi abordate în cele ce urmează.

Intenția de a unifica toate forțele cunoscute în una și aceeași reprezentare matematică a existat cu mult înainte de apariția teoriei relativității generalizate. În formă de proiect ea este prezentă încă în deceniul al cincilea al secolului al XIX-lea la Riemann și câteva decenii mai târziu la Clifford.

Modelul Kaluza-Klein contribuie la discuția despre unificare în filosofia științei în sensul unor elemente cheie ce nu sunt prezente în cazurile standard de unificare. Aportul esențial vine mai ales din presuposițiile de natură conceptuală pe care le presupune unificarea și de natură metafizică legată de caracterul topologic al spațiului și timpului fizic.

Modelul Kaluza-Klein este probabil un exemplu în care o teorie științifică a întâmpinat foarte serioase bariere conceptuale și în care probleme metafizice majore au fost aduse în discuție. În cele mai multe cazuri poziția fizicienilor față de acest model a fost rezervată, rezilientă, sau chiar agresivă. De pildă, este ușor de înțeles de ce atitudinea lui Einstein față de programele unificatorii a fost schimbătoare. De la un entuziasm cumpătat față de Kaluza, Einstein a trecut la un scepticism față de angajamentul realist al teoriei lui Kaluza. Dată fiind speranța lui Einstein de a explica caracterul indeterminist al mecanicii cuantice ca pe o caracteristică a teoriei câmpului, o vreme Einstein aștepta din partea programelor unificaționale să ofere o explicație a indeterminismului cuantic prezent în interpretarea ei standard. În cele din urmă Einstein a renunțat să caute explicația mecanicii cuantice în teoriile câmpului. El a avut mai apoi o atitudine sceptică în fața utilizării mecanicii cuantice în modele destinate descrierii câmpurilor de interacțiune și implicit în ceea ce îl privește pe Klein.¹⁸ Alți fizicieni au fost foarte ironici la adresa programelor extra-dimensionale (de pildă, W. Pauli, M. Born și chiar Einstein iar mai apoi A. Pais¹⁹) și față de utilizarea celei de a cincea dimensiuni. Este a cincea dimensiune un element real, cu alte cuvinte caracterizează ea spațiul fizic sau, din contră, este doar un simplu instrument matematic, caz în care a

¹⁸ Astfel se explică de ce într-un material scris împreună cu P. Bergmann și destinat modelului lui Kaluza, Einstein nu menționează aproape deloc numele lui O. Klein (doar într-o notă de subsol ca referință pentru prezentarea lui Kaluza) A. Einstein and P.G. Bergmann, "On a Generalization of Kaluza's Theory of Electricity", *Annals of Mathematics* 39, no. 3 (1938), 683. Klein este cel care a folosit formalismul cuantic în modelul său. Einstein în cele din urmă a preferat programele proiective aplicate în teoria relativității care permit rescrierea ecuațiilor în cinci dimensiuni ca proiecții pe o varietate cvadridimensională la care se adaugă un câmp de interacțiune.

¹⁹ Vezi Abraham Pais, *The Genius of Science: A Portrait Gallery*, Oxford University Press, 2000, p. 133.

cincea dimensiune nu este decât o caracteristică a spațiului *reprezentării* și prin urmare nu are caracter invariant și obiectiv.²⁰ O întrebare firească este următoarea: cât de dependent este modelul Kaluza-Klein de realitatea celei de a cincea dimensiuni?

Înainte de a oferi răspunsuri la întrebările de mai sus voi descrie teoriile lui Kaluza și Klein. Sub multe aspecte, programul de geometrizare a fizicii propus de Kaluza și Klein (în cele ce urmează mă voi referi la modelul Kaluza-Klein pentru a descrie varianta elaborată datorată lui Klein în 1926 precum și dezvoltările ulterioare datorate lui Thiry, 1948, dar anterioare generalizării la câmpuri Yang-Mills) conține mai multe elemente de unificare pe care doresc să le evidențiez:

- realitatea este descrisă de o teorie 5-dimensională în care metrica conține nu doar potențialul câmpului gravitațional, ci și potențialul câmpului electromagnetic (Kaluza).
- rolul esențial pe care geometria, mai precis topologia, îl joacă în cazul lui Klein;
- rolul mecanicii cuantice și modul în care a cincea dimensiune este legată de formalismul mecanicii cuantice în modelul lui Klein.

§ 2. Th. Kaluza și introducerea celei de a cincea dimensiuni

Pentru a înțelege mai bine ideea originală a lui Kaluza voi defini programul de geometrizare a fizicii (idee datorată lui H. Weyl și A. Eddington). Un câmp fizic descris de o teorie poate fi considerat "geometrizat" dacă potențialul său se regăsește în totalitate ca parte a metricii acelei teorii. Unicul obiect fizic geometrizat de teoria gravitației a lui Einstein este câmpul gravitațional care se regăsește în totalitate în tensorul Riemann al curburii.²¹ Conceptul newtonian de magnitudine a forței este înlocuit în teoria relativității cu cel de "grad" de curbura a spațiu-timpului. Gravitația este unicul câmp fizic ce poate fi geometrizat folosind simbolurile Christoffel asociate metricii $g_{\mu\nu}$ de tip Riemann în patru dimensiuni deoarece ele sunt

²⁰ De exemplu, singularitățile în soluțiile ecuației câmpului ale lui Einstein pot fi eliminate pe baza aceluiași criteriu: dacă ele reprezintă doar caracteristicile sistemului de coordonate, ele sunt considerate doar simple aparențe. Dacă ele rămân "invariante" la alegerea sistemului de coordonate, singularitățile sunt reale.

²¹ O metrică de tip Riemann este cea în care transportul unui vector de-a lungul unei curbe geodezice conservă a) magnitudinea acestuia, și b) unghiul format de doi vectori dar *nu* conservă orientarea. O metrică non-riemanniană este cea în care presupuziția a) este eliminată. Simbolurile Christoffel și tensorul Ricci au forma menționată doar în cazul metricii riemanniene.

“saturate” cu câmpul gravitațional (nu pot conține alte câmpuri decât cel gravitațional):²²

$$\Gamma_{\mu\nu}^{\lambda} = \frac{1}{2} g^{\lambda\rho} \left(\frac{\partial g_{\rho\nu}}{\partial x^{\mu}} + \frac{\partial g_{\mu\rho}}{\partial x^{\nu}} - \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x^{\rho}} \right) \quad (1)$$

Pentru a îngloba în teoria gravitației și interacțiunea electromagnetică, ecuația lui Einstein conține în membrul drept tensorul energie impuls $T_{\mu\nu}$:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = 8\pi G T_{\mu\nu} \quad (2)$$

care în cazul în care doar sursele electromagnetice sunt prezente ia forma:

$$T_{\mu\nu} = F_{\mu\rho} F_{\nu}^{\rho} - \frac{1}{4} g_{\mu\nu} F_{\rho\sigma} F^{\rho\sigma} \quad (3)$$

Dar în acest caz câmpul electromagnetic nu este geometrizat în sensul definit mai sus. A geometriza câmpul electromagnetic ar însemna să includem în expresia lui $g_{\mu\nu}$ (sau a derivatelor sale) în mod explicit vectorul A_{μ} (sau derivatele sale).

În anii '20 și '30, demersurile de unificare ajunseseră la un impas. Un obstacol s-a ridicat în fața oricărei încercări de unificare, deoarece următoarele supoziții s-au dovedit inconsistente:

(S-1) *metrica varietății spațio-temporale este riemanniană;*

(S-2) *spațiul fizic are patru dimensiuni;*

(S-3) *relativitatea generală și electromagnetismul pot fi unificate în sensul geometrizării (definit mai sus).*

Ideea lui Kaluza a fost de a respinge afirmația **(S-2)** și de a păstra **(S-1)** pentru a facilita obținerea rezultatului **(S-3)**. Pentru a geometriza teoria electromagnetică, Kaluza a propus includerea interacțiunii electromagnetice

²² Saturarea simbolurilor Ricci cu câmpul gravitațional este adevărată doar pentru metrica de tip Riemann. Weyl a reușit să unifice electromagnetismul și gravitația în patru dimensiuni cu o metrică non-riemanniană. Dar așa cum au remarcat Einstein și Pauli, formalismul lui Weyl implică faptul că amplitudinea unui câmp vectorial depinde de “istoria” sa de parcursul urmărit în spațiu-timp, lucru infirmat de observațiile empirice. Vezi L. O’Raifeartaigh and N. Straumann, “Gauge Theory: Historical Origins and some Modern Developments”, în *Reviews of Modern Physics* 72, no. 1 (Ianuarie, 2000), p. 18 și Thomas Ryckman, *The Reign of Relativity: Philosophy in Physics, 1915-1925*, Oxford University Press, 2005), cu precădere cap. 4.

descrise de 4-vectorul A_μ în metrica $g_{\mu\nu}$ și păstrarea formei sale riemanniene. Metrica $g_{\mu\nu}$ este un tensor ce poate fi exprimat ca o matrice 4x4. Unica metodă de a împlini dezideratul de unificare era extinderea metricii la o matrice 5x5 prin suplimentarea cu o coloană și o linie ce conțin câmpul vectorial electromagnetic în forma unui 4-vector A_μ . Noua varietate spațio-temporală ce descrie gravitația și electromagnetismul are cinci dimensiuni, iar vectorii sunt descriși ca: $\hat{x}^m = (x^\mu, y)$, unde $m, n=0...4$ și $\mu, \nu=0...3$ și toate cantitățile în cinci dimensiuni sunt marcate prin semnul grafic $\hat{\cdot}$.²³ Metrica în cinci dimensiuni este dată de:

$$\hat{g}_{mn} = \begin{pmatrix} g_{\mu\nu} & \alpha A_\mu \\ \alpha A_\nu & \phi \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$d\hat{s}^2 = \hat{g}_{mn} d\hat{x}^m d\hat{x}^n \quad (5)$$

Analog teoriei în patru dimensiuni se poate defini tensorul Ricci:

$$R_{\mu\nu} = \frac{\partial \Gamma_{\mu\nu}^\lambda}{\partial X^\lambda}, \quad R_{4\nu} = -\alpha \partial^\mu F_{\mu\nu} = \kappa T_{4\nu}, \quad R_{44} = -\square \phi \quad (6)$$

Dar analogia cu cazul 4-dimensional nu este perfectă. În expresia (4) de mai sus apare un termen arbitrar sub forma unui câmp scalar $g_{44}=\phi$ care în teoria Kaluza-Klein nu joacă niciun rol și – cel puțin la o primă evaluare – introducerea sa pare *ad hoc*. El va juca un rol esențial în dezvoltările ulterioare ale teoriei. O altă condiție impusă de Kaluza a fost “cilindricitatea” celei de a cincea dimensiuni sub forma unei ipoteze simplificatoare conform căreia toate mărimile variază foarte lent (sau deloc) pe a cincea dimensiune:

$$\partial_4 g_{mn} = 0 \quad (7)$$

restricție ce nu își găsește un analog în formularea cvadri-dimensională a lui Einstein.

Alte presupuziții ale modelului Kaluza sunt mai naturale și mai puțin arbitrare. Ceea ce este însă interesant este că “dinamica” de-a lungul celei de a cincea axe are o interpretare total diferită decât dinamica pe direcțiile spațiale obișnuite. Pentru a da o interpretare adecvată componentei u^4 a vectorului viteză u , Kaluza a presupus că această componentă este apropiată

²³ Folosesc aici notația consacrată în ultimii ani: x^0 este coordonata temporală iar $x^1...x^3$ sunt coordonatele spațiale, în genere desemnate prin x, y, z .

de unitate, în timp ce toate celelalte componente sunt mici comparativ cu unitatea. Pentru dimensiuni macroscopice aproximația este acceptabilă, dar pentru dimensiunile unui electron ea nu este deloc satisfăcătoare. În consecință mișcarea unui electron nu urmează o curbă geodezică în cinci dimensiuni.

Prin urmare, a cincea componentă a vectorului viteză u este proporțională cu densitatea de sarcina electrică ρ :

$$\rho_0 = 2\alpha\mu_0 u^4 \quad (8)$$

Înainte de a trece la teoria lui Klein, doresc să sintetizez cele câteva presupuziții sau aproximații pe care se bazează teoria lui Kaluza.

(C-1) a cincea dimensiune este cilindrică deoarece este inobservabilă;²⁴

(C-2) a cincea dimensiune este de tip spațial;²⁵

(C-3) a cincea dimensiune are topologia mulțimii numerelor reale.

(C-4) teoria păstrează structura teoriei generale a relativității și reprezintă o extensie minimală a gravitației la cinci dimensiuni;²⁶

(C-5) metrica diferă foarte puțin de valoarea sa euclidiană

(C-6) vitezele implicate sunt relativ mici.

Principalul rezultat al teoriei lui Kaluza este:

(R-1) deducerea a atât a ecuațiilor Einstein ale câmpului, cât și a ecuațiilor lui Maxwell din una și aceeași ecuație în 5-D.

Problemele de natură filosofică ale teoriei lui Kaluza sunt demne de menționat. În primul rând, nu există nici un fel de suport empiric în favoarea existenței celei de a cincea dimensiuni. În al doilea rând, generalizarea metricii ds^2 de la patru dimensiuni la cinci dimensiuni nu este garantată conceptual. În al treilea rând, formalismul introduce doi termeni suplimentari cărora nu li se dă nici o interpretare: câmpul scalar ϕ și distanța în a cincea dimensiune pe care câmpurile nu variază semnificativ. Teoria este o teorie de tip vacuum (în care materia nu este prezentă iar $T_{\mu\nu}=0$), dar nu oferă

²⁴ Condiția de cilindricitate conduce la ideea unei posibile identificări a două puncte de pe axa x^4 ce sunt separate de o distanță suficient de mică. Vom reveni asupra acestei idei în discuția formalismului lui Klein. Aici Kaluza nu face nici o supoziție legată de identificarea lor.

²⁵ În sensul în care semnătura metricii este în continuare (- + + +) iar $g_{44}>0$.

²⁶ Formalismul folosește simbolurile Christoffel, tensorul Ricci, etc.

o extensie de la soluția de tip vacuum la cea masivă. Și nu în ultimul rând, teoria lui Klein tratează în mod diferit particulele macroscopice și cele elementare. Conform calculului, electronii nu se deplasează pe traiectorii geodezice.

Din punct de vedere filosofic, teoria nu oferă predicții și pare incapabilă să ofere o explicație. Se pare că unicul deziderat al teoriei lui Klein a fost pur și simplu unificarea, fără a se avea în vedere alte virtuți semantice precum "adevărul" teoriei sau puterea ei de predicție. O astfel de strategie pare destul de îndepărtată de practica științifică curentă. Lăsând la o parte toate aceste probleme, unele majore, altele surmontabile, teoria lui Kaluza este capabilă să unifice interacțiunea gravitațională cu cea electromagnetică.

Din motivele menționate, prețul plătit pe unificare a fost pentru mulți fizicieni mult prea ridicat iar caracterul arbitrar al teoriei mult prea pronunțat pentru a fi considerată o teorie reală ce descrie lumea fizică.

§ 3. Oskar Klein, compatificare și mecanică cuantică

Soluția la unele dintre neajunsurile teoriei lui Kaluza a fost oferită de Klein în două articole publicate în 1926, conținând mai multe presupuziții destinate îndeosebi rezolvării și depășirii impasurilor modelului lui Kaluza.²⁷ Cea mai importantă este însă legată de *topologia* celei de a cincea dimensiuni. Topologia direcției x^4 este compactă, adică se impune o condiție de compacitate ce înlocuiește condiția de cilindricitate a lui Kaluza.²⁸ În analogia oferită de Einstein, direcția a cincea este "buclată" și formează un cilindru care seamănă cu un furtun. Diametrul acestui cilindru este estimat de Klein la 10^{-30} cm. Privită cu instrumentele accesibile nouă, cilindrul x^4 are un diametru

²⁷ Oskar Klein, "Quantentheorie und Fünfdimensionale Relativitätstheorie" în *Zeitschrift Für Physik A/Hadrons and Nuclei* V37, nr. 12 (12/01/, 1926), 895-906.; Oskar Klein, "The Atomicity of Electricity as a Quantum Theory Law", *Nature* 118, nr. 2971 (1926), p. 516. Descrieri detaliate ale teoriei lui Klein pot fi găsite în Ioan Muntean, "Mechanisms of Unification in Kaluza-Klein Theory" în *Ontology of Spacetime*, Dennis Dieks (editor), Vol. 2 (Amsterdam: Elsevier, 2008), 279-299; Jeroen van Dongen, "Einstein and the Kaluza-Klein Particle", în *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 33B, nr. 2 (2002). În scurta descriere ce urmează mă voi referi la materialul din *Zeitschrift...*

²⁸ Condiția revine la a spune că pentru orice x^4 și x'^4 , $x'^4 = x^4 + 2\pi\lambda_4$. Cu alte cuvinte două puncte separate sunt identice dacă distanța între ele este un multiplu de $2\pi\lambda_4$. Parametrul λ_4 este foarte important și va reveni în actualitate în deceniul al optulea. Pentru moment, el reprezintă raza de curbură a celei de a cincea dimensiuni și nu are o valoare stabilită. Topologia celei de a cincea dimensiuni nu mai este liniară ci este identică cu topologia unui cerc.

mult prea mic pentru a fi observat. Ce ar putea deduce un observator aflat la o distanță egală cu distanța Pământ-Soare despre un furtun de 1 cm diametru? Nu va observa decât o linie dreaptă lipsită de grosime. Această explicație este suficientă pentru a elimina argumentul observațional împotriva existenței celei de a cincea dimensiuni. Dar pentru a evita o eroare *ad ignorantiam*, este incorect să deducem din imposibilitatea observării ei directe, inexistența ei. Deși nu ar fi fost pentru prima oară și nici pentru ultima dată în istoria științei, fizicienii au refuzat să accepte accesul noii entități neobservabile în "partenonul" variabilelor fizice.

Caracterul celei de a cincea dimensiuni nu a fost de la bun început clar, ea fiind interpretată ca o construcție auxiliară fără suport real. Un alt motiv pentru a adopta o astfel de atitudine cumpătată față de a cincea dimensiune este prezența unor singularități în ecuațiile ce descriu câmpul. În cele din urmă, "angoasa" față de singularități ce l-a caracterizat pe Einstein o bună bucată de vreme a dispărut, iar în zilele noastre fizica analizează cu maxim de interes soluțiile singulare la ecuațiile câmpului (celebrele "găuri negre" sunt singularități). Eliminarea unor teorii doar pe criteriul prezenței singularităților nu mai constituie actualmente un motiv de a ocoli o teorie.

Mai există o modificare în teoria lui Klein. În locul metricii propuse de Kaluza, Klein adaugă un termen de interacțiune cu A_μ în toți termenii g_{mn} , cu excepția lui g^{44} , care este păstrat proporțional cu ϕ .

$$\hat{g}_{mn} = e^{\phi\sqrt{3}} \begin{pmatrix} g_{\mu\nu} + e^{-\sqrt{3}\phi} A_\mu A_\nu & e^{-\sqrt{3}\phi} A_\mu \\ e^{-\sqrt{3}\phi} A_\nu & e^{-\sqrt{3}\phi} \end{pmatrix} \quad (9)$$

Voi face aici o scurtă remarcă legată de metoda folosită de Klein. Pentru a deduce metrica (9), Klein a folosit un principiu variațional de minimizare a acțiunii J în cinci dimensiuni:

$$J = \int P \sqrt{-|\hat{g}_{mn}|} dX^4 \quad \text{unde} \quad (10)$$

$$P = \sum \hat{g}^{ik} \left(\frac{\partial \Gamma_{\mu}^{i\mu}}{\partial x^k} - \frac{\partial \Gamma_{\mu}^{ik}}{\partial x^\mu} + \Gamma_{\nu}^{i\mu} \Gamma_{\mu}^{k\nu} - \Gamma_{\mu}^{ik} \Gamma_{\nu}^{\mu\nu} \right)$$

este un invariant. Dacă se postulează că variația acțiunii este nulă, $\delta J = 0$, se pot deduce două ecuații:

$$R^{ik} - \frac{1}{2} g^{ik} R + \frac{\alpha\beta^2}{2} S^{ik} = 0 \quad \text{și} \quad \partial_\mu \sqrt{-|\hat{g}_{mn}|} F^{i\mu} = 0 \quad (11)$$

Din (11) se pot deduce pe de o parte ecuațiile de câmp ale lui Einstein (2) și pe de altă parte ecuațiile Einstein-Maxwell în forma lor covariantă. Prin adăugarea termenilor de interacțiune $A_\mu A_\nu$ în expresia metricii g_{mn} , puterea de unificare a teoriei lui Klein a fost substanțial îmbunătățită.

O ultimă caracteristică a teoriei lui Klein asupra căreia doresc să atrag atenția este caracterul ei cuantic. Compactificarea celei de a cincea dimensiuni și formalismul cuantic sunt intim corelate. Pentru a demonstra puterea de explicație a noii sale teorii, Klein a folosit mecanica cuantică în formularea ei datorată lui E. Schrödinger, studiind comportamentul unei funcții de undă în cinci dimensiuni: $\Psi = \Psi_0 e^{ih\Phi(x^m)}$. Ecuația unei unde cu masă nulă în cinci dimensiuni este:

$$\frac{1}{\sqrt{-|\hat{g}_{mn}|}} \partial_m (\sqrt{-|\hat{g}_{mn}|} \hat{g}^{mn} \partial_n) \Psi = 0 \quad (12)$$

Aplicând procedura standard din mecanica cuantică, Klein a identificat "operatorul impuls" cu $P_m = \partial_m \Phi$. Aplicând apoi conservarea fazei unei de-a lungul celei de a cincea dimensiuni, se poate deduce condiția de staționaritate a unei unde separate în variabila x^4 . $\Psi = \exp(i e(\hbar c \sqrt{2\kappa})^{-1} x^4 \psi(x^\mu))$

Impulsul pe direcția x^4 este: $p_4 = q/c\sqrt{2\kappa}$ iar din condiția de stabilitate a fazei se poate deduce forma:

$$\omega \int p dx = 2\pi n \quad \text{și} \quad p_4 = q/c\sqrt{2\kappa} \quad (13)$$

Din (13) avem:

$$p_4 = ne/c\sqrt{2\kappa} = \hbar/\lambda_4 \quad (14)$$

Și folosind date numerice, se poate estima λ_4 ca având o dimensiune apropiată de 10^{-30} cm.

Pe scurt, supozițiile și aproximările modelului lui Klein sunt:

(C-7) A cincea dimensiune este *compactificată* deoarece este inobservabilă;

(C-8) Metrica este dedusă dintr-un principiu variațional precum în teoria generală a relativității.

(C-9) Câmpurile nu depind de a cincea dimensiune, deoarece în dezvoltarea lor în serii Fourier doar primul termen ($n=0$) este luat în considerare. În a cincea dimensiune, toate câmpurile sunt periodice dată fiind condiția (C-7). Prin

urmare se poate deduce că toate câmpurile sunt de forma:

$$A_{\mu}(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} A_{\mu}^{(n)}(x)e^{iny/\lambda_4} =$$

sau $A_{\mu}^{(0)}(x) + A_{\mu}^{(1)}(x)e^{iy/\lambda_4} + A_{\mu}^{(2)}(x)e^{i2y/\lambda_4} + \dots$

Rezultatele teoriei sunt surprinzătoare. Spre deosebire de Kaluza, Klein reușește să *explice* cuantizarea sarcinii electrice și grupul de simetrie al electromagnetismului ca simetrie externă a structurii spațio-temporale.

(R-2) Teoria deduce ecuațiile electromagnetismului și pe cele ale relativității generale dintr-un principiu variațional.

(R-3) Ca rezultat al **(C-7)** și **(C-8)**, noua metrică **(9)** conține un termen de interacțiune suplimentar sub forma produsului $A_{\mu}A_{\nu}$.

(R-4) Datorită compactificării **(C-7)**, electronii se deplasează pe traiectorii geodezice.

(R-5) Din nou, datorită **(C-7)**, simetria electromagnetismului este explicată ca o simetrie a varietății spațio-temporale în cinci dimensiuni.

(R-6) Datorită condiției **(C-7)**, funcția de undă Ψ pe x^4 este staționară.

(R-7) Ca o consecință a **(C-7)** și **(R-7)**, teoria explică cuantizarea sarcinii electrice.

Din lipsă de spațiu voi insista aici doar asupra rezultatelor **(R-5)** și **(R-7)**.²⁹

§ 4. Rezultatele teoriei lui Klein

(R-5). Grupul de invarianță "gauge" al teoriei electromagnetice este $U(1)$. Compactificarea celei de a cincea dimensiuni este necesară nu doar pentru explicarea cuantizării sarcinii electrice, ci și din considerente legate de simetrie. O teorie T poate unifica două alte teorii T_1 și T_2 dacă simetria teoriei T , $U(T)$, conține ambele grupuri de simetrie $U(T_1)$ și $U(T_2)$. Simetriile "gauge" asociate câmpului A : $\mathbf{A}'^{\mu} = \mathbf{A}^{\mu} - \frac{\partial \lambda}{\partial x^{\mu}}$ sunt deduse din simetriile spațiu-timpului în 5-D, mai precis din translația de-a lungul direcției x^4 dată

²⁹ Contrar așteptărilor, formalismul în cinci dimensiuni nu unifică de fapt mecanica cuantică și teoria relativității, cel puțin nu în forma dată de Klein în 1926. Importanța mecanicii cuantice pentru deducerea rezultatelor **(R-2)** și **(R-5)** este evidentă. Cu toate acestea, formalismul cuantic este *utilizat* de Klein, dar nu constituie parte a noii teorii. Rezultatele mecanicii cuantice (chiar la nivelul de dezvoltare al teoriei din primele decenii) nu pot fi deduse în totalitate din teoria lui Klein.

de $x'^4 = x^4 + \lambda(x'')$. Cu alte cuvinte, simetria internă a electromagnetismului este dedusă în teoria lui Klein din simetria externă a spațiu-timpului. Prin procedura propusă numărul de simetrii interne este redus la simetriile externe ale structurii spațio-temporale. Se poate spune că modelul Klein unifică prin reducerea *tipului* de simetrii: teoriile anterioare, electromagnetismul și teoria gravitației, au amândouă simetrii interne și externe, în timp ce grupul de simetrii interne ale modelului Klein este redus la cele externe, doar la grupul de simetrii (translații și rotații) ale structurii \mathbb{R}^5 .

(R-7). Cuantizarea sarcinii electrice este poate cel mai spectaculos rezultat pe care nici electromagnetismul în forma sa clasică, nici mecanica cuantică nu l-au putut oferi. În ambele teorii, cuantizarea sarcinii electrice și simetria $U(1)$ sunt luate drept “fapte brute” în sensul în care ele nu sunt explicate sau detaliate în cadrul teoriei. Extinderea bagajului explicativ al teoriei Kaluza-Klein este destul de evidentă. Într-adevăr modelul răspunde la întrebarea “de ce este sarcina electrică cuantizată?” prin “datorită topologiei celei de a cincea dimensiuni”. Noul fapt brut este aici compactificarea celei de a cincea dimensiuni. Este adevărat că valoarea sarcinii electrice este dedusă din raza de compactificare, dar faptul ca atare este contingent și se explică prin accesibilitatea observațională pe care o avem în cazul parametrului e comparativ cu totala inaccesibilitate în cazul lui λ_4 .

Modelul lui Klein nu este însă lipsit de probleme. Dezvoltarea Fourier a maselor este divergentă, ceea ce implică existența unei serii de mase ce cresc în funcție de termenul dezvoltării (n). Spectrul masiv infinit nu este doar contraintuitiv, ci și problematic din punctul de vedere al teoriei. Problema însă își va găsi o rezolvare elegantă în 1980, datorată lui A. Salam.³⁰

În ceea ce privește variantele standard ale teoriei explicației *qua* unificare, se poate remarca faptul că atât **(R-5)**, cât și **(R-7)** sau **(R-8)** pot fi considerate rezultate explicative ce sporesc cardinalitatea domeniului inițial K (în sensul lui Friedman). Propozițiile ce unifică sunt **(C-7)**, **(C-8)** și respectiv **(C-9)**. De pildă, **(C-7)** satisface definiția explicației **(D-1)**, iar este ușor de văzut de ce **(R-7)** nu este o consecință al teoriei electromagnetice în formularea ei clasică.

În ceea ce privește problema conjuncției, deseori amintită de oponenții unificării, se poate arăta că nici modelul lui Klein, nici cel al lui Kaluza nu constituie conjuncții triviale ale celor două teorii. Motivul pe care îl invoc aici este existența parametrilor neinterpretați ϕ și λ_4 care nu se regăsesc în teoriile inițiale: gravitația și electromagnetismul.

³⁰ Vezi A. Salam and J. Strathdee, “On Kaluza-Klein Theory”, *Annals of Physics* 141, no. 2 (1982).

În privința argumentelor “stringente” ale lui Kitcher, se poate spune că principiul variațional are în general caracteristicile unui argument “stringent” în care acțiunea rămâne în forma ei non-logică, iar Lagrangianul este de forma $\mathcal{L}(q_i, \dot{q}_i, t)$ unde q poate fi înlocuită cu metrica g în cazul a cinci dimensiuni. Acțiunea generală $S = \int \mathcal{L}(q_i, \dot{q}_i, t) d^5x$ devine $S = \int R^{(5)} \sqrt{-|\hat{g}^{(5)}|} d^5x$ în forma ei Hilbert-Einstein dacă se folosește un Lagrangean pentru metrica g . În cazul în care se acceptă ipoteza (C-7), se poate realiza o separare a lui x^4 de celelalte patru variabile iar integrala este exprimată doar în patru dimensiuni x^0 - x^3 :

$$S = - \int d^4x \sqrt{-g} \phi \left(\frac{{}^{(4)}R}{16\pi G} + \frac{1}{4} \phi^2 F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \frac{2}{3k^2} \frac{\partial^\mu \phi \partial_\mu \phi}{\phi^2} \right) \quad (15)$$

În ceea ce privește ipotezele Margaretei Morrison, modelul Kaluza-Klein constituie un caz în care unificarea are drept rezultat sporirea capacității explicative a teoriei unificatoare și astfel ea vine în contradicție cu teza “tare” (T-1)³¹, în timp ce modelul expus aici confirmă principial tezele (T-2) (cel puțin până la redeschiderea discuției de către Witten în 1981 prin articolul programatic “Search for a realistic Kaluza-Klein theory”³², modelul Kaluza-Klein nu și-a propus să ofere o metafizică sau ontologie a celei de a cincea dimensiuni) și (T-3) (în cazul de față rolul structurii matematice fiind jucat din nou de principiul minimei acțiuni).

Caracterul contraintuitiv al modelului nu este însă foarte evident. Este clar că modelul cvadridimensional este la fel de contraintuitiv. De ce este timpul o dimensiune adăugată celorlalte trei dimensiuni spațiale? Prin ce se deosebește timpul (x^0) de celelalte dimensiuni? Diferența dintre timp și spațiu este un subiect filosofic interesant, însă pentru fizica clasică spațiul și timpul au fost întotdeauna diferite. Cum este atunci posibilă adăugarea timpului la spațiul euclidian? Aceași întrebare se ridică în cazul modelului Kaluza-Klein. Iar răspunsul este în cele din urmă același: x^0 și x^4 reprezintă elemente ale realității având naturi diferite decât cea a spațiului (reprezentat prin x^1 , x^2 și x^3), dar ele constituie elemente cheie pentru domeniul reprezentării.³³ Dacă a patra dimensiune s-a dovedit o excelentă ipoteză

³¹ Vezi p. 62 mai sus.

³² E. Witten, “Search for a Realistic Kaluza-Klein Theory”, în *Nucl. Phys. B* 186 (1981), 412.

³³ Întrebarea pusă de Einstein și Meyer în 1923 legată de faptul că în modelul Kaluza se induce o asimetrie între x^4 pe de o parte și x^0 - x^3 pe de altă parte nu pare justificată. Teoria specială a relativității conține deja o astfel de simetrie între x^0 și x^1 - x^3 .

științifică ce a dus la apariția teoriei speciale a relativității, de ce nu am putea adăuga x^4 având ca unic scop virtuțile epistemice ale noii teorii: simplitatea, puterea de unificare, reducerea numărului de tipuri de fapte brute, reducerea tipurilor de ecuații etc.? Toate acestea reprezintă virtuțile epistemice ale modelului Kaluza-Klein pe care am încercat să le expun în paginile materialului de față. Într-un material pe care intenționez să îl public curând voi încerca să leg rezultatele lui Kaluza și Klein de fundamentele teoriei *string* și să arăt locul pe care modelul Kaluza-Klein îl ocupă în cadrul teoriei *string*.

Mai există un element care nu poate fi ignorat. Teoria electromagnetică în formularea ei clasică este clar o teorie falsă deoarece oferă predicții eronate pentru toate fenomenele cuantice. Teoria gravitațională, chiar în formularea lui Einstein este falsă atâta vreme cât nu explică comportamentul particulelor elementare și nu oferă explicații satisfăcătoare pentru momentele foarte timpurii ale istoriei universului. Nimeni însă nu poate ignora relevanța unor teorii unificatorii care s-au dovedit a fi false: teoria newtoniană, electromagnetismul, etc. La fel, *stricto sensu*, modelul Kaluza-Klein nu este adevărat, din varii motive: nu explică câmpurile fermionice, ci doar o parte din cele bosonice, este o teorie clasică în care nici unul dintre câmpuri nu este cuantizat, ignoră celelalte interacțiuni din natură, nu este o teorie cuantică etc.

§ 5. Concluzie: unificarea științifică în cazul teoriei Kaluza-Klein

Dacă modelul Kaluza-Klein nu oferă predicții noi sau nu poate fi confirmat sau infirmat de datele observaționale, ce avantaje ne conferă adoptarea unei ipoteze atât de îndrăznețe precum (C-7)? Probabil sugestia cea mai elocventă este că teoria Kaluza-Klein explică mai multe fapte prezente în lume pe care le consideram "brute". Este evident că noul fapt brut, anume compactificarea dimensiunii x^4 , înlocuiește cuantizarea sarcinii electrice. Cum judecăm astfel de fapte brute? Am găsit prin teoria Kaluza-Klein adevăratele "fapte brute"? Aproape sigur răspunsul este negativ. Dar ceea ce a reușit să întrevadă Klein, poate pe baza unei ipoteze legată de continuumul spațio-temporal, este că mecanica cuantică joacă un rol central în legătura între electromagnetism și forța gravitațională.³⁴ Klein a reușit să arate importanța pe care simetriile externe ale variației spațiotemporale o are în descoperirea simetriilor interne ale teoriilor, precum simetria de grup

³⁴ Mai mulți autori sugerează serendipitatea lui Klein, mai ales în ceea ce privește intuiția sa profundă legată de invarianții gauge ale teoriilor de tip Yang-Mills. Vezi L. O'Raiheartaigh, *The Dawning of Gauge Theory*, Princeton University Press, 1997, p. 147.

U(1) a electromagnetismului. Procedura este curent folosită în teoria string și poartă numele de “dimensional reduction” (reducere a dimensionalității).

Scopul materialului de față este de a reliefa importanța unei virtuți teoretice a unei teorii și nu acela de a discuta adecvarea ei empirică. Din punctul nostru de vedere, cele două probleme pot fi tratate separat și pot rămâne independente la nivelul unei analize filosofice. În mare măsură observația de față afectează criticile de natură empiristă aduse teoriei String de L. Smolin și P. Woit, autori care trec cu vederea importanța virtuților teoretice.³⁵

Morrison a evidențiat cu deosebită claritate importanța studiilor de caz în care este discutată unificarea. Pentru Morrison, în știință avem de a face mai ales cu pretinse unificări sau cu unificări triviale, decât cu situații în care unificarea este explanativă. Nu neg că nu există unificări triviale. O teorie care explică totul pe baza afirmației “Orice se întâmplă este rezultatul Voinței lui Dumnezeu” instanțiază o unificare absolută și totodată o putere explicativă absolută. Alte cazuri de teorii pretins unificatorii sunt teoria flogistonului sau teoria monetaristă în economie. Marxismul, pe lângă alte pretinse virtuți, a încercat să explice toate fenomenele sociale pe baza unuia și aceluiași principiu al luptei de clasă. Același lucru se poate spune despre psihanaliză.³⁶ Unificarea în sine nu este de prea mare folos dacă nu se discută și alte chestiuni legate de explicație, confirmare, simplitate, caracter ad-hoc etc. Sarcina analizei filosofice “de caz”, sugerate de Morrison, este să ceară graul de neghină, să separe cazurile bune de cazurile rele de unificare. Ceea ce am reușit—sper—prin argumentul meu este să arăt cum unificarea conduce la o putere explicativă sporită, reduce caracterul ad-hoc al supozițiilor și simplifică formalismul. Am evitat să generalizez rezultatul analizei mele, dar am sugerat că modul în care Klein a reușit să explice diferite aspecte ale electromagnetismului poate fi generalizat la teoria String. Controversele filosofice dar și științifice iscate în jurul teoriei string pot beneficia de prezenta analiză a unificării de tip Kaluza-Klein. Nu pretind însă că rezultatele prezente ar putea fi extrapolate și în cazul altor teorii științifice în afara fizicii teoretice. Ceea ce este însă interesant în cazul lui Klein și ceea

³⁵ Pentru referințe, vezi nota 5. Un material extrem de succint scris de doi filosofi ai științei care argumentează într-o direcție asemănătoare celei sugerate aici este R. Frigg și N. Cartwright, “String Theory Under Scrutiny”, *Physics World* 20, Septembrie (2006), pp. 14-15.

³⁶ O critică timpurie a acestor pretinse teorii explicative poate fi găsită în Karl R. Popper, *Conjectures and Refutations; the Growth of Scientific Knowledge* (New York: Basic Books, 1962), p. 412.

ce ar putea fi prezent în unificarea științifică în general este prezența unui element exterior care joacă un rol esențial în procesul de unificare.

Bibliografie

- Callender, C. și N. Huggett. "Why Quantize Gravity (Or any Other Field for that Matter)?" *Philosophy of Science* 68, nr. 3 (2001): S382-S394.
- Cremmer E., Julia B., și J. Scherk. "Supergravity Theory in Eleven-Dimensions." *Physics Letters B* 76, (1981): 409.
- Dongen, Jeroen van. "Einstein and the Kaluza-Klein Particle." *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 33B, nr. 2 (2002): 185-210.
- Einstein, A. și P.G. Bergmann. "On a Generalization of Kaluza's Theory of Electricity." *Annals of Mathematics* 39, nr. 3 (1938): 683.
- Friedman, M. "Explanation and Scientific Understanding." *Journal of Philosophy* 71, nr. 17 (Ianuarie, 1974): 5-19.
- Frigg, R. și N. Cartwright. "String Theory Under Scrutiny." *Physics World* 20, September (2006): 14-15.
- Halonen, I. și J. Hintikka. "Unification—it's Magnificent but is it Explanation?" *Synthese* 120, nr. 1 (1999): 27-47.
- Kitcher, P. "Unification as a Regulative Ideal." *Perspectives on Science* 7, (1999): 337-348.
- Kitcher, P. "Explanatory Unification and the Causal Structure of the World." Chap. 11, în W. Salmon(ed), *Scientific Explanation*, Vol. XIII. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1989.
- Kitcher, P. "Explanatory Unification." *Philosophy of Science* 48, (December, 1981): 507-531.
- Kitcher, P. "Explanation, Conjunction, and Unification." *Journal of Philosophy* 73, no. 22 (Aprilie, 1976): 207-212.
- Klein, O. "Quantentheorie Und Fünfdimensionale Relativitätstheorie." *Zeitschrift Für Physik A Hadrons and Nuclei* V37, nr. 12 (12/01/, 1926): 895-906.
- Klein, O. "The Atomicity of Electricity as a Quantum Theory Law." *Nature* 118, nr. 2971 (1926): 516.
- McAllister, J.W. *Beauty & Revolution in Science*, New Ed ed.Cornell University Press, 1999.
- Morrison, M. *Unifying Scientific Theories: Physical Concepts and Mathematical Structures*, Cambridge University Press, 2000.
- Muntean, I. "Mechanisms of Unification in Kaluza-Klein Theory." În *Ontology of Spacetime*, Dennis Dieks(ed.). Vol. 2, 279-299. Amsterdam: Elsevier, 2008.

- O’Raifeartaigh, L. *The Dawning of Gauge Theory*, Princeton University Press, 1997.
- O’Raifeartaigh, L. și N. Straumann. “Gauge Theory: Historical Origins and some Modern Developments.” *Reviews of Modern Physics* 72, nr. 1 (Ianuarie, 2000): 1-23.
- Pais, A. *The Genius of Science: A Portrait Gallery*, Oxford University Press, 2000.
- Penrose, R. *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*. Prima ed americană, New York: A.A. Knopf, 2005.
- Popper, K.R. *Conjectures and Refutations; the Growth of Scientific Knowledge*. New York: Basic Books, 1962.
- Ryckman, Th. *The Reign of Relativity: Philosophy in Physics, 1915-1925*, Oxford University Press, 2005.
- Salam, A. și J. Strathdee. "On Kaluza-Klein Theory." *Annals of Physics* 141, nr. 2 (1982): 316-352.
- Smolin, L. *The Trouble with Physics: The Rise of String Theory, the Fall of a Science, and what Comes Next*. Boston, New York: Houghton Mifflin, 2006.
- Weinberg, S. *Dreams of a Final Theory: The Scientist’s Search for the Ultimate Laws of Nature*, Vintage, 1992.
- Weinberg, S. “Viewpoints on String Theory: The Elegant Universe.” NOVA & PBS. <http://www.pbs.org/wgbh/nova/elegant/view-weinberg.html> (accesată 7/2/2008, 2008).
- Witten, E. "Search for a Realistic Kaluza-Klein Theory." *Nucl.Phys.B* 186, (1981): 412.
- Woit, P. *Not Even Wrong : The Failure of String Theory and the Search for Unity in Physical Law*. New York: Basic Books, 2006.
- Wüthrich, Ch. “To Quantize Or Not to Quantize: Fact and Folklore in Quantum Gravity.” *Philosophy of Science* 72, (2005): 777-788.