

Marek Woszczek

Serie Leibniza i problem dynamiki w kwantowaniu grawitacji

CZAS, PRZYCZYNOWOŚĆ I KAUZALNY MODEL LEIBNIZA

Procedury matematyczne stosowane w kanonicznej kwantyzacji grawitacji (najstarszym, nieperturbacyjnym programie kwantowania grawitacji, zapoczątkowanym przez prace Paula Diraca w latach 40.), między innymi od czasu przełomowych artykułów Bryce'a S. DeWitta,¹ wyznaczyły trwały trend w badaniach nad kosmologią kwantową, ale jednocześnie zrodziły szereg konceptualnych problemów, których status należałoby klasyfikować jako osobliwe przecięcie fizyki i metafizyki. Punktem wyjścia jest kanoniczne hamiltonowskie sformułowanie ogólnej teorii względności [dalej: OTW] (P.A.M. Dirac, P.G. Bergmann, A.B. Komar), zdefiniowanie dyfeomorficznie niezmienniczej wielkości zwanej „działaniem Hilberta” dla metrycznych pól tensorowych i dekompozycja globalnie hiperbolicznej czasoprzestrzeni na osobne składowe: czasową oraz przestrzenną, czyli przestrzennopodobną 3-powierzchnię Σ_t z indukowaną trójmetryką $h_{ab}(x)$, którym towarzyszą (jako stopnie swobody cechowania) odpowiednie składowe pełnej 4-metryki reprezentowane „funkcją upływu” N i „wektorem przesunięcia” N_i . Teoria ta ma więc w sumie cztery podstawowe więzy (ich kanonicznie sprzężone pędy zanikają), które kodują jej dynamikę: trzy z nich to więzy pędowe (albo „dyfeomorfizmowe”) związane z *przesunięciem* (są to geometrycznie, infinitesimalne generatory dyfeomorfizmów stycznych do 3-powierzchni Σ_t), a jeden, skalarny i czasopodobny — związany z *upływem* i dyfeomorfizmami normalnymi do Σ_t — jest hamiltonowski. Takie ujęcie na 3-geometriach (zwłaszcza R. Arno-

¹ B.S. DeWitt, *Quantum Theory of Gravity. I: The Canonical Theory*, „Physical Review”, 1967, vol. 160, nr 5, s. 1113-1148; tegoż, *Quantum Theory of Gravity. II: The Manifestly Covariant Theory*, „Physical Review”, 1967, vol. 162, nr 5, s. 1195-1239.

witta, S. Desera i C.W. Misnera,² a także J.A. Wheelera w ramach programu geometrodynamiki) wydawało się na początku naturalne, gdyż brało po prostu za punkt wyjścia (przed kwantyzacją) dane na określonej, wyróżnionej arbitralnym cięciem, przestrzennopodobnej hiperpowierzchni Σ_t (powierzchni Cauchy'ego) o „wewnętrznej” krzywiznie $h_{ab}(x)$, a następnie opisywało ich ewolucję przez uwzględnienie kanonicznie z nią sprzężonych pędów $\pi^{ab}(x)$, odnoszących się do krzywizny „zewnętrznej” H^{ab} , która wynika z arbitralnego, tzn. zapewnianego przez ogólną kowariantność teorii, wyboru czterech funkcji N i N_i , niewchodzących do równań więzowych (tensor H^{ab} mierzy, jak hiperpowierzchnia Σ_t jest zakrzywiona względem czterowymiarowej rozmaitości obwiedniej). Całą OTW, ujętą jako hamiltonowski układ z więzami, można w ten sposób zakodować odpowiednim „super-hamiltonianem” jako operatorem (funkcjonałem) oraz jego równaniem dyspersji, wiążącym zmianę działania ze zmianami współrzędnych pola, a więc możliwe jest efektywne zrekonstruowanie całej 4-geometrii czasoprzestrzeni.³ Wprowadzenie takiego operatora jest naturalną konsekwencją powyższego rozumowania, choć wiąże się z bardzo poważnymi trudnościami technicznymi (matematycznymi), zwłaszcza ekstremalną nieliniowością, których częściowe rozwiązanie przyniosło dopiero wprowadzenie przez Abhay'a Ashtekara tzw. zmiennych pętlowych (nowych zmiennych kanonicznych) i nowe hamiltonowskie sformułowanie OTW w 2. połowie lat 80.

Ale właśnie w tym punkcie centralny dla teorii wymóg kowariancji zrodził dodatkowy problem, który dziedziczą *wszystkie podejścia oparte na kanonicznej kwantyzacji*: problem czasu. Jeśli wprowadzimy nawias Poissona wzmiankowanej składowej hamiltonowskiej z funkcjami zmiennych kanonicznych, uzyskujemy „ewolucję czasową” z wpływem ortogonalnym do Σ_t , ale ponieważ każda foliacja w \mathbf{M}^4 jest arbitralna (wszystkie one wyczerpują w OTW pełną grupę dyfeomorfizmów czasoprzestrzeni, $Diff(\mathbf{M})$), nie jest zaskoczeniem, że w takim formalizmie wszystkie obserwabie fizyczne (Diraca) — tzn. funkcje na przestrzeni fazowej, które są niezmiennicze pod cechowaniem — poissonowsko komutują ze wspomnianymi więzami, a hamiltonian (złożony tutaj *wyłącznie* z więzów) zanika. Stawia to pod znakiem zapytania samą sensowność mówienia o „ewolucji czasowej” wszechświata z klasycznej kosmologii, skoro żaden wpływ nie jest wyróżniony i *nie da się zapisać żadnego kwantowego równania ewolucji typu schrödingerskiego*, co związane jest po prostu z dyfeomorficzną niezmienniczością lagranżjanu grawitacyjnego przeniesioną na teorię po kwantyzacji (należy pamiętać, że całą OTW można zapisać w formalizmie

² R. Arnowitt, S. Deser, C.W. Misner, *The Dynamics of General Relativity*, [w:] *Gravitation: An Introduction to Current Research*, ed. L. Witten, New York 1962, Wiley, s. 227-265. Krótki wykład formalizmu ADM w kontekście kanonicznego kwantowania grawitacji (obok odmiennego formalizmu Diraca i idei superprzestrzeni Wheelera) np. w: G. Esposito, *Quantum Gravity, Quantum Cosmology and Lorentzian Geometries*, Berlin — Heidelberg 1994, Springer, s. 43-49, pełny zaś wykład w standardowym podręczniku Roberta M. Waldy, *General Relativity*, Chicago 1984, The University of Chicago Press, s. 255 i nast., s. 459-469.

³ B.S. DeWitt, *Quantum Theory of Gravity...*, s. 1113 i nast.

Hamiltona-Jacobiego *bez zmiennej czasowej*).⁴ Choć wyrażano nadzieję, że w konkretnych modelach fizycznych pewne wyróżnione wielkości teorii będą mogły być zinterpretowane jako „czas” i wskaźnik „dynamiki”, to jednak okazało się, że rodzi to dodatkowo szereg teoretycznych trudności. W literaturze dotyczącej kwantowania grawitacji zagadnienie to określono jako problem „zamrożonego formalizmu” lub „zamrożonej ewolucji”. Struktura formalna teorii kanonicznej kwantyzacji dała więc początek poważnej kontrowersji dotyczącej możliwości „odzyskania” dynamiki i czasu z opisu, który najwyraźniej jest niedynamiczny i bezczasowy (w sensie „czasu uniwersalnego”). W tej perspektywie wydaje się rozsądne założenie, że powyższe sformułowanie problemu „zamrożenia” czyni go jednocześnie nierozwiązywalnym, o ile nie towarzyszy mu głębsze przemyślenie metafizycznych założeń na temat samej przyrody. Należy raczej skupić się na fundamentalnych charakterystykach przyrody, które mogą być podstawą modelowania emergencji czasu w makroskali, a nie podejmować wysiłek sztucznego odzyskiwania czasu w formalizmie, który u podstaw upływ czasu wyklucza. Różnica pomiędzy tymi dwoma podejściami może okazać się ostatecznie nie tak wielka, jak się początkowo wydaje, ale istotne jest położenie w punkcie wyjścia nacisku na konieczność przemyślenia właściwości czasu w kontekście podstawowych procedur kwantyzacji, bez rozciągania makroskopowych, zdroworozsądkowych intuicji na wszystkie skale przyrody.

Jednym z ciekawszych i najbardziej obiecujących tropów jest kauzalny model (czy teoria) czasu, ale jednocześnie stwarza on szereg dalszych conceptualnych problemów, których w kosmologii kwantowej nie da się zignorować. Zanim przyjrzymy się mu bliżej, zauważmy, że jego problematyczność okazuje się wynikać nie tyle nawet z samej próby przeprowadzenia ontologicznej redukcji fenomenologii upływu czasu, ile przede wszystkim z jego odwołania do ontologicznie ujmowanej przyczynowości. Szczególna teoria względności [STW] precyzuje rzecz jasna sens przyczynowości przez powiązanie jej z pseudoeuklidesową geometrią M^4 i wprowadzenie interwału czasoprzestrzennego Δs , ale już w mechanice kwantowej [QM] i kwantowej teorii pola [QFT] jej sens pozostaje permanentnie niejasny, przy czym kwestia determinizmu / indeterminizmu to jedynie fragment całej kontrowersji. Wypada jednak w tym miejscu wyjaśnić, dlaczego kauzalny model czasu warto wziąć pod uwagę pomimo jego kłopotliwości w kontekście mikrofizyki: zakładamy wprost, że opis struktury zdarzeń fizycznych za pomocą gładkiej, czasowo orientowalnej rozmaitości różniczkowej M^4 jest *efektywnym przybliżeniem* pewnej *fundamentalnej struktury kauzalnej pra-stanów fizycznych*, której prymarną charakterystyką jest *dyskretność*. Następnie zakładamy, że nie ma żadnego powodu *a priori*, by rozciągać intuicyjną

⁴ „Problem czasu” nie jest więc przypadkowym artefaktem procedur kwantyzacji (wygenerowanym przez niewłaściwe podejście), lecz ma swe źródło w samej strukturze OTW, w czym zgadzam się z opinią np. Juliana Barboura (*The End of Time*, London 2001, Phoenix) czy Johna Earmana: teorie kwantowania grawitacji — o ile nie podejmują radykalnych teoretycznych kroków — dziedziczą tę właściwość wraz z traktowaną jako punkt wyjścia hamiltonowską OTW, która jest teorią w pełni *sparametryzowaną*.

charakterystykę czasową na porządek tej mikrostruktury pra-stanów i uznajemy, że bardziej prawdopodobne jest raczej, iż relacje czasoprzestrzenne są manifestacją tej struktury powyżej skali Plancka. Przez „intuicyjną charakterystykę czasową” należy tu przede wszystkim rozumieć otwarcie prezentystyczne definiowanie czasu za pomocą A -ciągów (by odwołać się do terminologii J.M.E. McTaggarta⁵).

Akceptując wstępnie argumentację T. Placeka, dotyczącą modeli „upływającego czasu” i wspartą na ontologicznie interpretowanej technice *branchingu*,⁶ możemy zgodzić się wyjściowo, że przyjęcie tej charakterystyki „upływu” wymaga konsekwentnego uznania indeterminizmu, który — jak powszechnie się sądzi — ma być istotną właściwością samej QM, wyznaczającej jedynie amplitudy przejścia między stanami fizycznymi. Przyjęcie klasycznie rozumianego, ścisłego determinizmu metafizycznego zdaje się podważać model „świata z przemijaniem”, gdyż całą charakterystykę czasu wyczerpuje wtedy porządek zdarzeń dany jedynie B -ciągami McTaggarta.⁷ Możemy teraz postawić pytanie: *czy możliwe jest postulowanie dyskretnej, kwantowej struktury mikrostanów powiązanych przyczynowo, przy jednoczesnym zachowaniu globalnego zdeterminowania historii w czasoprzestrzeni w taki sposób, by teoria ta mogła zachować zdolność do generowania fizycznego modelu czasu?* Sam McTaggart na przykład, jak wiadomo, utrzymywał zmianę jako podstawową składową intuicyjnego pojęcia „czasu”, stąd i uznawał B -ciągi za niezdolne do wygenerowania czasu fizycznego. Gdyby tak było w istocie, wtedy wszystkie deterministyczne kwantowe teorie grawitacji, budowane na pierwotnych, łańcuchowych relacjach kauzalnych, okazywałyby się również niezdolne do jego modelowania, tworząc rozdział między formalizmem a fenomenologią. Chcielibyśmy przynajmniej wiedzieć, czy wciąż musimy wybierać jedynie między „zamrożonym formalizmem” wszechświata blokowego [WB] OTW i jej kanonicznie skwantowanych wersji (bez dynamiki) — tzn. ontologią „zamrożonego czasu” — a naiwnym, *quasi*-newtonowskim prezentyzmem, którego połączenie z teoriami fizycznymi wymaga sporej akrobatyki.

Kwestia determinizmu i powiązania przyczynowego pra-stanów przyrody jest o tyle problematyczna, o ile w pohumowskiej i pokantowskiej filozofii przyrody wciąż wyraźny jest opór wobec przyznawania związkom kauzalnym realności i ontologicznej mocy (tj. dopuszczenia, by ich występowanie było obiektywną, fundamentalną własnością przyrody). W modelu geometrycznym M^4 danym w STW związki te nie mają wyraźnie dynamicznego charakteru i choć są wbudowane w ten model, to jednak nie jest jasne, jaka jest ich natura (geometryzacja relacji czasoprzestrzennych paradoksalnie odsuwa to pytanie na dalszy plan). Konsekwencją tej nie-

⁵ John M. Ellis McTaggart, *The Unreality of Time*, „Mind: A Quarterly Review of Psychology and Philosophy”, 1908, vol. 17, s. 457-474.

⁶ T. Placek, *Czas i przemijanie*, [w:] *Czas...*, red. M. Heller, J. Mączka, Tarnów 2001, Biblos, s. 84-103.

⁷ Taki związek determinizmu z eternalizmem zakładają też na przykład Avshalom C. Elitzur i Shahar Dolev, *Black Hole Evaporation Entails an Objective Passage of Time*, „Foundations of Physics Letters”, 1999, vol. 12, nr 4, s. 309-323.

jasności jest oczywiście propozycja ontologii WB, która potraktowana zbyt naiwnie prowadzi do niewłaściwych wyobrażeń, zwłaszcza „wszechświata statycznego” (choć ontologia ta wcale *nie musi* pociągać za sobą konieczności jego uznania — mylące jest tu może samo początkowe wyobrażenie wszechświata-„bloku”, budowanego przez jego statyczne „elementy” czy „obszary”). Konieczność mówienia o jakiejś wersji ontologii WB wynika po prostu, rozpatrując zagadnienie minimalistycznie, z podstawowych symetrii zachowywanych przez zjawiska fizyczne i kodowanych algebrą Poincarégo (z generatorami translacji i transformacji Lorentza), co stwarza poważny problem dla każdej ontologii prezentystycznej, która chciałaby uwzględnić wszystkie efekty relatywistyczne w naturalny sposób⁸: można zgodzić się z filozoficznym argumentem, iż kontrakcja długości czy „paradoks bliźniąt” byłoby *łącznie niemożliwe*, gdyby obiekty świata pozostawały jedynie trójwymiarowe.⁹ Odsuwając na bok wyobrażenie „wszechświata statycznego”, musimy zadać właśnie pytanie, czy możliwe jest myślenie o WB w kontekście modeli kwantowych tak, by w pełni zachować centralne pojęcie „związków przyczynowych” (przyczynowości), ale nie traktować dynamiki i czasu jako „zamrożonych” przez *zupełność łańcuchów* tych związków. Już tutaj, w punkcie wyjścia, jest jasne, że poruszamy się w jakiejś mierze na granicach zwykłej intuicji fizycznej i zdroworozsądkowych wyobrażeń na temat „czasu” i „dynamiki”.

W *Badaniach dotyczących rozumu ludzkiego* (1748) David Hume sformułował słynne streszczenie swojego stanowiska, dotyczące subiektywności przyczynowości:

Wyobraźmy sobie, że jakiś osobnik, obdarzony zresztą wielkim rozumem i inteligencją, znalazłby się zniemacka na świecie. Niewątpliwie zauważyłby od razu sukcesję rzeczy i następujących kolejno zdarzeń; niczego więcej nie potrafiłby wykryć. Żadne rozumowanie nie pozwoliłoby mu początkowo dojść do pojęć przyczyny i skutku, ponieważ owe siły, dzięki którym dokonują się wszystkie operacje przyrody (*the particular powers, by which all natural operations are performed*), nigdy nie podpadają pod zmysły i ponieważ nie można na tej tylko podstawie, że jedno zjawisko w jednym przypadku wyprzedziło inne, wyprowadzić rozumnego wniosku, że

⁸ Wymaga to m.in. wprowadzenia literalnie rozumianej „rzeki” niewykrywalnego fizycznie eteru, odrzucenia ontologicznej zasady względności (co ma nieakceptowalne konsekwencje w kosmologii) i uznania *a priori* spektakularnej niezupełności STW i OTW (jak czyni na rzecz absolutnej przestrzeni np. Michael Tooley w *Time, Tense and Causation*, Oxford 1997, Oxford University Press), co łącznie sprawia, że dyskwalifikuję tu prezentyzm i fizyczną ontologię *A*-ciągów — jak wielu filozofów fizyki — *a posteriori*, zob. np. S. Saunders, *How Relativity Contradicts Presentism*, [w:] *Time, Reality, and Experience*, ed. C. Callender, Cambridge 2002, Cambridge University Press, s. 277-292 albo J.M. Mozersky, *Time, Tense and Special Relativity*, „International Studies in the Philosophy of Science”, 2000, vol. 14, nr 3, s. 221-236. Ontologię WB bazującą na OTW akceptuje również niezależnie wielu fizyków-teoretyków i kosmologów, w tym C. Rovelli, Ch. Isham, B. Greene, C. Kiefer, R. Gambini czy P. Davies.

⁹ Zob. np. V. Petkov, *Relativity, Dimensionality, and Existence*, [w:] *Relativity and the Dimensionality of the World (Fundamental Theories of the Physics*, vol. 153), ed. V. Petkov, Dordrecht 2007, Springer, s. 127 i nast.; oraz tegoż, *Relativity and the Nature of Spacetime*, Berlin — Heidelberg — New York 2005, Springer.

pierwsze jest przyczyną drugiego. Związek ich może być arbitralny (*arbitrary*) i przygodny (*casual*).¹⁰

Odpowiedź Hume'a na fakt poznawczej oczywistości związków przyczynowych to znana teza, iż nie są one wynikiem żadnego apriorycznego rozumowania, lecz jedynie nawyku (*custom*), przyzwyczajenia (*habit*). Stanowisko Kanta trzydzieści lat później (1781) również traktowało przyczynowość podmiotowo, ale już jako „czyste pojęcie intelektu” (*ein reiner Verstandesbegriff*) i konieczny warunek doświadczenia: „Tylko przez to więc, że poddajemy następstwo zjawisk, a więc i wszelką zmianę, prawu przyczynowości, jest możliwe samo doświadczenie, tzn. empiryczne poznanie (*empirische Erkenntnis*) zjawisk”.¹¹ Tak silne upodmiotowienie sensu związku kauzalnego przyczyniło się do znacznego postępu epistemologii filozoficznej, ale jednocześnie zahamowało na długo próby głębszego zrozumienia przyczynowości w kontekście ontologii przyrody i fizyki. Jednakże pół wieku przed Hudem z taką całościową propozycją modelu ontologicznego wystąpił jeszcze G.W. Leibniz, u którego odnajdujemy wszystkie zasadnicze elementy kontrowersji nawiedzającej dziś podstawy fizyki. Dziwne napięcie pomiędzy wyobrażeniem „świata-bloku” a dynamiką oraz między determinizmem a czasowością można odnaleźć *in nuce* w całej konstrukcji kosmologicznej Leibniza i w tym sensie zapowiada ona wprost metafizyczne problemy kwantowych teorii grawitacji. W istocie ontologia przyczynowości oraz pochodny problem natury czasu znajdują swój wspólny mianownik w owych niewidzialnych „*particular powers*”, o których wspominał Hume — a właśnie związek dynamiki, przyczynowości i globalnej determinacji przyrody funduje cały Leibnizjański model przyrody.

Nie ma potrzeby omawiać tu szczegółowo zagadnienia dynamiki u Leibniza — skoncentrujemy się raczej na kilku jego ideach, które mają istotne znaczenie z perspektywy współczesnych teorii fundamentalnych w fizyce. W ujęciu Leibniza wszystkie procesy i relacje fizyczne (takie jak czas i przestrzeń) są redukowalne do „procesu podstawowego”, którym są zmiany stanów substancji — niefizycznych, niematerialnych „monad”. Stany te w terminologii Leibniza to „percepcje”, tj. odwzorowania stanów wszystkich innych monad wszechświata w danym momencie. Percepcje mają ściśle określony porządek w historii, którą jest każda monada, i porządek ten, tworzący „serię” czy „ciąg” (*B*-ciąg),¹² można nazwać „prawem” owej serii-

¹⁰ D. Hume, *An Enquiry Concerning Human Understanding*, La Salle, IL. 1907, Open Court Pub., s. 42 (tłum. pol. J. Łukasiewicza i K. Twardowskiego: D. Hume, *Badania dotyczące rozumu ludzkiego*, Warszawa 1977, PWN, s. 53).

¹¹ I. Kant, *Kritik der reinen Vernunft*, hg. und. eingel. von K. Vorländer, Halle a. Saale 1907, Verlag von Otto Hendel, s. 215 (tłum. pol. R. Ingardena: I. Kant, *Krytyka czystego rozumu*, Kęty 2001, Antyk, s. 219).

¹² W kwestii obrony antyprezentyzycznego stanowiska (z którym się zgadzam), iż serie (= monady) Leibniza to z pewnością nie *A*-ciągi, lecz raczej *B*-ciągi z porządkiem kauzalnym, zob. np. M.J. Futch, *Leibniz's Metaphysics of Time and Space*, Dordrecht — Boston 2008, Springer, zwł. s. 129-142. Interesujące byłoby określenie, na ile serie Leibniza odpowiadałyby *C*-ciągom „reprezentacji”, które w duchu heglowskim wprowadził McTaggart.

monady (łac. *lex seriei*, fr. *loi de series*),¹³ nadającym jej unikalną tożsamość metafizyczną. Ponieważ każda skończona monada dysponuje własną perspektywą odzwierciedlenia wszystkich innych stanów i jednocześnie żadna z nich nie jest wyróżniona w tym uniwersum, przeto spełniona jest w nim „zasada równoważności”, gwarantująca możliwość pełnej transformacji jednego odzwierciedlenia (*point de rapport*) na każde inne, co Leibniz wizjonersko ukazuje przez obrazowe odwołanie do symetrii, które dziś koduje się algebraicznie grupami obrotów.¹⁴ Ten pomysł filozofa jest oczywiście antycypacją współczesnej regulatywnej zasady fizyki teoretycznej, tzn. ogólnej kowariancji postulowanej teorii fundamentalnej, gdyż tylko to, co jest niezmiennikiem tych pełnych transformacji, uznaje on za rzeczywiste (jest to dość specyficzna *realitas* pojmowana wprost jako *veritas geometrica*).¹⁵ U Leibniza przejście od jednej percepcji do drugiej jest ciągłe (a więc nie możemy tu mówić o jakimkolwiek fizycznym skwantowaniu), ale o wiele ważniejsze jest zaakcentowanie aktywnej natury tych stanów: przejście to nigdy nie jest wywołane przez jakąkolwiek siłę zewnętrzną, lecz jest *wewnętrzną dynamiką samych tych stanów-percepcji*. Oznacza to, że koncepcja zmiany u Leibniza nie jest w jakimkolwiek sensie „kinematograficzna” (by posłużyć się wyrażeniem Bertranda Russella) czy „mechaniczna”, mimo iż określał on czasem monady jako „bezcieleśne automaty”. Każda percepcja zawiera wewnętrzne „dążności” czy „usiłowania” (*nisus = conatus = appetitio*, „apetycja”) do powstania percepcji kolejnej określonego typu i jest to najbardziej podstawowy rodzaj aktywności-działania w metafizycznym, tj. przedfizycznym rozumieniu tego słowa (Leibniz utożsamiał ją z „entelechią” i „formą” Arystotelesa¹⁶). Jest ona nawet rzeczywista w najbardziej podstawowym rozumieniu tego słowa, bardziej rzeczywista niż „czas” i „ruch”, gdyż zarówno jeden, jak i drugi nigdy nie istnieją w całości, lecz jedynie momentalnie — a właśnie ów „moment” ostatecznie ma naturę siły, działania.¹⁷ Pojęcie „apetycji” ma tu kluczowe znaczenie, ponieważ są one właśnie owymi Humowskimi „*particular powers*”, które odpowiadają za całą **r e a l n o ś ć p r z y c z y n o w o ś c i** w świecie.

Percepcje są u Leibniza powiązane ze sobą przyczynowo nie za pomocą abstrakcyjnej relacji następstwa, ale bezpośredniego wpływu, czyli związku dynamicznego,

¹³ Używam tu wyjątkowo pojęcia „serii”, a nie matematycznego „szeregu” czy ogólniej „ciągu”, by podkreślać jego pierwotnie metafizyczny sens zgodnie z intencją samego Leibniza.

¹⁴ G.W. Leibniz, *Discourse de metaphysique*, [w:] tegoż, *Die philosophischen Schriften*, hg. von C.I. Gerhardt, Berlin 1875-1890, Weidmann, Bd. 4, s. 439 (tłum. pol. S. Cichowicza w: G.W. Leibniz, *Główne pisma metafizyczne*, Toruń 1995, s. 27).

¹⁵ G.W. Leibniz, *Szkic listu do B. des Bossesa* (1712), w: tegoż, *Die philosophischen Schriften*, Bd. 2, s. 438.

¹⁶ G.W. Leibniz, *Pismo bez tytułu nt. filozofii kartezjańskiej* (1702), w: tegoż, *Die philosophischen Schriften*, Bd. 4, s. 395.

¹⁷ G.W. Leibniz, *Specimen Dynamicum*, w: *Leibnizens mathematische Schriften*, hg. von C.I. Gerhardt, Halle 1860, H.W. Schmidt, Bd. 6, s. 235 (tłum. pol. M. Olszewskiego w: G.W. Leibniz, *Pisma z metafizyki natury*, Toruń 1999, Wyd. Rolewski, s. 77 i nast.).

ponieważ żadna z nich nie da się pomyśleć w oderwaniu od apetycji, które ją wywołały. Leibniz podkreślał nieustannie, że podstawowe siły (*vires primitivae*) manifestują się w monadach przez „wewnętrzne tendencje” (*tendentiae internae*), które zawsze są przejawem prawa (tożsamości) konkretnej serii-monady.¹⁸ Tendencje *nie są* oczywiście związkami koniecznymi, co oznacza, iż również relacja przyczynowa między dwoma percepcjami-stanami w uniwersum Leibniza *nie jest* konieczna. Każdy taki konkretny stan jest z perspektywy logicznej stanem przygodnym, gdyż logicznie dopuszczalne jest również wystąpienie stanu mu przeciwnego, a więc determinacja przyczynowa, o której mówi Leibniz, nie jest w przypadku procesów świata determinacją mocną (koniecznościowo-logiczną lub „geometryczną” w jego własnej terminologii). Mamy tutaj zatem osobliwy Leibnizjański indeterminizm, zasadzający się na fakcie metafizycznej przygodności każdego stanu uniwersum, ale zgodny z przyznaniem mu globalnych racji jego wystąpienia. Kluczową tezą Leibniza jest bowiem twierdzenie o *zupełności każdej serii* (monady), która jest globalnie określona — jej logicznym odpowiednikiem jest teza o *zupełności pojęć* i analityczności wszystkich sądów prawdziwych. Należy przytoczyć tu słynny wyjaśniający ustęp z korespondencji Leibniza i Antoine’a Arnaulda:

...wskutek powiązania rzeczy cały wszechświat (...) byłby w gruncie całkiem inny i to inny byłby od samego początku, gdyby najmniejsza rzecz szła innym trybem, niż idzie. Dzieje się tak nie dlatego, by zdarzenia były konieczne, lecz dlatego, że są pewne po dokonanych przez Boga wyborze tego oto możliwego wszechświata, którego pojęcie zawiera całe następstwo rzeczy. (...) Niech będzie prosta ABC przedstawiająca pewien czas. I niech będzie pewna substancja indywidualna, ja sam dla przykładu, która przez ten czas utrzymuje się, czyli pozostaje przy istnieniu. Weźmy najpierw mnie, który utrzymuję się przez czas AB, a potem mnie, który utrzymuje się przez czas BC. Skoro zaś się zakłada, że to ta sama indywidualna substancja trwa lub że to ja sam utrzymuję się w czasie AB i przebywam wówczas w Paryżu oraz że to nadal ja sam utrzymuję się w czasie BC i przebywam wówczas w Niemczech, musi być jakaś racja nadająca prawdziwość słowom, że my trwamy, to znaczy, że ja, który byłem w Paryżu, jestem obecnie w Niemczech. Gdyby bowiem jej nie było, miałoby się prawo rzec, że jest to ktoś inny. Co prawda, me wewnętrzne doświadczenie przekonało mnie *a posteriori* o tej tożsamości, trzeba jednak, by istniała ona również *a priori*. Otóż nie można mieć tutaj innej, jeśli wszystkie moje przymioty z poprzedniego czasu i stanu, jak również wszystkie moje przymioty z następnego czasu i stanu są orzecznikami tego samego podmiotu — *insunt idem subiecti*. Otóż, czym jest stwierdzenie, że orzecznik należy do podmiotu, jeśli nie powiedzeniem, że pojęcie orzecznika znajduje się poniekąd zawarte w pojęciu podmiotu? A skoro odkąd tylko zacząłem istnieć, można było prawdziwie powiedzieć o mnie, że przydarzyłyby się mnie to czy tamto, przeto trzeba przyznać, że te orzeczniki były prawami zawartymi w podmiocie, czyli w mym zupeł-

¹⁸ G.W. Leibniz, *List do B. de Voldera* (1704 lub 1705), w: tegoż, *Die philosophischen Schriften*, Bd. 2, s. 275: „Vires derivativas ad phaenomena relego, sed vires primitivas manifestum esse censeo nil aliud esse posse quam tendentias internas substantiarum simplicium, quibus certa suae naturae lege de perceptione in perceptionem transeunt, atque inter se simul conspirant, eadem universi phaenomena diverso habitu referentes, quod necesse est oriri a communi causa”. Zob. też np. M.-T. Liske, *Gottfried Wilhelm Leibniz*, München 2000, C.H. Beck, s. 93.

nym pojęciu stanowiącym to, co zwie się ja i jest podstawą powiązania wszystkich mych odrębnych stanów, a co Bóg doskonale znał odwiecznie.¹⁹

Zupełność serii, zinterpretowana ontologicznie, prowadzi do silnego napięcia między „determinizmem” i „indeterminizmem” w obrębie całego systemu Leibniza, które często prowadziło i prowadzi komentatorów do sporej konfuzji: pomimo przygodności każdego stanu, struktura („przedustawna harmonia”) zrealizowanego wszechświata gwarantuje, iż jest on już globalnie określony, zarówno w całości, jak i w odniesieniu do każdego poszczególnego stanu (Leibniz posługuje się tu językiem teologii i mówi o wyborze, *electio* danego świata, tj. globalnego układu uporządkowanych stanów, przez Absolut). Ponieważ czas jako fenomen fizyczny (i tylko fenomen) jest ugruntowany w kauzalnym i dynamicznym porządku serii stanów, przeto dochodzi tu jeszcze napięcie między *ontologiczną zupełnością całej serii* (a więc jej „blokowością”) a *realnością dynamiki*, która przecież wynika z faktu, że stany bazowe są zarazem aktywnościami, „siłami”. Oznacza to zatem, że Leibniz w swoim modelu postuluje coś w rodzaju harmonijnego połączenia blokowości świata oraz nieredukowalnej, fundamentalnej dynamiki, która nie jest wcale „zamrożona” (pomimo iż z koncepcją WB kojarzy się automatycznie — jak widzieliśmy już wcześniej — problem „zamrożonej dynamiki”). Jest jasne, i należy to podkreślić z całą mocą, że pra-dynamika, o której pisze Leibniz, jest przedczasowa, a nawet bezczasowa, gdyż tendencje-dążności, gwarantujące *realność przyczynowości* w obrębie serii (*B*-ciągu), nie rozgrywają się czasowo i czasu nie potrzebują (nawet pomocniczo, w celu ich definiowania). Sfera monad Leibniza nie jest sferą dynamiki fizycznej „w czasie”, lecz pozostaje na pograniczu fizyki i czystej ontologii.²⁰ Zrozumienie tego wizjonerskiego pomysłu Leibniza jest bardzo ważne, gdyż nie pozwala zredukować tej pra-dynamiki do standardowej dynamiki fizycznej, czyli znacznie uogólnia to pojęcie, zupełnie nie respektując zdroworozsądkowej intuicji czasu i „stawania się”.

Okazuje się już na tym tylko historycznym przykładzie, że sztywne powiązanie idei „blokowości” z brakiem dynamiki jest sporym uproszczeniem, sugerującym, że przy budowaniu ogólnego modelu kosmologicznego cały problem w tym zakresie sprowadzałby się do prostej konceptualnej alternatywy: „wszechświat blokowy” *versus* „wszechświat dynamiczny”. W istocie samo to przeciwstawienie jest jednak problematyczne, gdyż opiera się na mocno zawężającym definiowaniu „blokowości” i „dynamiki”. Przyjmijmy więc tutaj, że „blokowość” jest właściwością każdego modelu kosmologicznego, który *w dowolny sposób wprost zakłada lub musi zakładać (ze względów formalnych czy matematycznych): (1) fizyczną zupełność bazowych historii w tym świecie, takich jak na przykład leibnizjańskie „serie” stanów, oraz (2) ich formalną spójność w postaci globalnych reguł pełnych transformacji (symetrii),*

¹⁹ G.W. Leibniz, *Korespondencja z Antoine'em Arnauldem*, przeł. S. Cichowicz i J. Kopania, Warszawa 1998, PWN, s. 38 i nast.

²⁰ Na temat pojęcia „ontologii” zob. np. Jerzy Perzanowski, *Ontologie i ontologii*, „Studia Filozoficzne”, 1988, nr 6-7, s. 87-99.

takich jak leibnizjańskie „transformacje perspektyw”, gwarantujących, iż żadna z historii nie jest ontologicznie wyróżniona.

Widać, iż warunek (2) ma swój fizyczny, maksymalny odpowiednik w zasadzie ogólnej kowariancji, którą — jak oczekujemy — musi spełniać każda teoria fundamentalna, a zatem, niemalże z definicji, model kosmologiczny wsparty na pełnej (nie-sformułowanej jeszcze) kwantowej teorii grawitacji będzie modelem „blokowym” na skutek jej rozszerzonej ogólnej kowariancji (rozumianej zarówno fizycznie, jak i ontologicznie). Zauważmy dalej, iż taka „blokowość” nic nie przesądza jeszcze o „realności” czy „zamrożeniu” dynamiki — jest po prostu wyrażeniem pewnej podstawowej właściwości przyrody, którą poprzez globalne symetrie rekonstruuje matematyczna struktura kwantowej teorii grawitacji opartej na OTW.²¹ Ponieważ warunek (2) nie wymusza *a priori* zachodzenia (1), przeto należy dopuścić możliwość słabszej i mocniejszej „blokowości”, przy czym ta druga byłaby wynikiem spełnienia obu tych warunków (interpretowanych ontologicznie, a nie metodologicznie czy epistemologicznie). Blokowość „słaba”, osłabiająca lub całkowicie uchylająca warunek (1), może próbować zakładać pewną hybrydową ontologię „wszechświata blokowego rosnącego” (ze „wzrostem” beczasowym), jak w modelowym przypadku koncepcji George’a F.R. Ellisa (kwantowy „kryształujący WB”, gdzie sam czas ma się „rozwijać” wzdłuż linii świata!)²² czy we wcześniejszych propozycjach Karela V. Kuchařa (negujących, bez pogwałcania OTW, równorzędne traktowanie więzów pędowych i hamiltonowskich, co sprawia, że czas nabiera nieco substancjalistycznego charakteru).²³ Zupełność bazo-

²¹ Dlatego, jak sądzę (w czym zgadzam się np. z Johnem Earmanem), zdefiniowana powyżej „blokowość” nie jest jedynie usuwalnym „problemem” teorii wywodzących się z tradycji kanonicznej kwantyzacji, jak np. program pętlowej kwantowej grawitacji, ale dotyczy na różne sposoby wszystkich znaczących podejść w kwantowaniu OTW, od programu twistorowego R. Penrose’a (gdzie całe globalne historie fotonów w M^4 reprezentowane są punktami w zespolonej rzutowej przestrzeni twistorowej) po teorię superstrun. W perturbacyjnych wersjach tej ostatniej czasoprzestrzeń M^4 jest po prostu włączona do teorii przez iloczyn ze zwartymi 6-przestrzeniami Calabiego-Yau, zanurzenie zaś strun opisują zmienne, będące kwantowymi stopniami swobody teorii: a zatem wszystkie problemy związane z beczasowością i blokowością w kwantowaniu OTW pozostają (nie są tylko tak uwydatnione, jak w podejściach wywodzących się z kanonicznej kwantyzacji). W tym sensie, mimo iż teorie superstrun wywodzą się historycznie z fizyki cząstek, dziedziczą „blokowość” przez samo włączenie OTW — tego samego można się spodziewać również w ich postulowanej wersji nieperturbacyjnej (tzw. M-teoria), gdzie OTW ma się wyłaniać powyżej skali Plancka z teorii beczasowej.

²² G.F.R. Ellis, T. Rothman, *Time and Spacetime: The Crystallizing Block Universe*, „International Journal of Theoretical Physics”, 2010, vol. 49, nr 5, s. 988-1003.

²³ Zob. np. Karel V. Kuchař, *Canonical Quantum Gravity*, [w:] *General Relativity and Gravitation 1992 [Proc. of 13th Int. Conf. on General Relativity, Córdoba/Argentina, 28 VI-4 VII 1992]*, ed. R.J. Gleiser, C.N. Kozameh, O.M. Moreschi, Bristol — Philadelphia 1993, IOP Pub., s. 119-150. Zdaniem Kuchařa obserwowalne fizyczne nie powinny komutować z więzami hamiltonowskim i jeszcze przed kwantyzacją należy skonstruować klasyczną zmienną czasową T , służącą jako „czas tła” w kwantowym równaniu ewolucji.

wych historii w czasoprzestrzeni z warunku (1) mówi o tym, iż zamknięty wszechświat jest globalnie określony, tzn. jako całość „nie staje się” w żadnym zewnętrznym czasie ku całkowicie nieokreślonej przyszłości (nie istnieje dla historii żaden zewnętrzny czasowy parametr numerujący T): takie historie, równoważne B -ciągom, nie urywają się na globalnie zdefiniowanej, obiektywnej terażniejszości (może ona mieć sens *jedynie* lokalny i względny dla arbitralnego obserwatora fizycznego wewnątrz wszechświata, tzn. „teraz-i-tutaj”). Taki właśnie ontologiczny sens „zupełności” wydaje się też najbardziej odpowiedni dla zrozumienia cytowanej wypowiedzi Leibniza z jego korespondencji z A. Arnaudem. Warto pamiętać, że wyznacza to zarazem pewien typ globalnego zdeterminowania w świecie (*scil.* zbiorze uporządkowanych historii), ale wcale nie oznacza tym samym, że jakiegokolwiek jego stany czy przejścia między nimi są „konieczne” w sensie logicznym czy metafizycznym.²⁴ „Determinacja” ta jest konsekwencją aczasowej blokowości całości wszechświata, ale w żadnym wypadku *nie jest* klasycznie definiowanym, metafizycznym determinizmem sprawczym określonym na stanach fizycznych.

PRZYKŁAD BLOKOWEGO MODELU KOSMOLOGICZNEGO: KLASYCZNIE ROSNĄCE KAUSETY SORKINA I PROBLEM ICH KWANTYZACJI

Jeśli chcemy przyjrzeć się, czy i jak mogłoby funkcjonować ogólne (niewykluczające dynamiki) pojęcie „blokowości” w kontekście fundamentalnej teorii fizycznej, winniśmy posłużyć się przykładem konkretnego modelu kosmologicznego. Zakładamy ponownie, że model świata fizycznego budowany na gładkiej rozmaitości różniczkowej jest nieadekwatny, choć efektywny w odpowiednio określonej makroskali. Podstawowy problem z takim modelem polega na formalnej zewnętrzności metryki lorentzowskiej g_{ab} : skończony interwał między dwoma przyczynowo powiązаныmi zdarzeniami x i y musi zostać zewnętrznie określony, *zmierzony*, ale dla dowolnej pary takich zdarzeń zawsze istnieje jakieś zdarzenie z , w którego stożku przeszłości leży zdarzenie x , a w stożku przyszłości zdarzenie y (a zatem nie ma sensu jakiegokolwiek *zliczanie ilości* zdarzeń „między” x a y). Związana z tym kwestia nieskończonej podzielności ma także szerszy wydźwięk w związku z nieskończonościami teorii fizycznych: OTW (osobliwości), QFT i termodynamiki czarnych dziur (nieskończone wartości entropii horyzontu).²⁵ Dodatkowo powstaje problem mate-

²⁴ Zob. np. w kontekście teodycei Leibniza: P. Gut, *Leibniz. Myśl filozoficzna w XVII wieku*, Wrocław 2004, Wyd. UWr, s. 150-170, oraz, przede wszystkim: R.M. Adams, *Leibniz: Determinist, Theist, Idealist*, New York — Oxford 1994, Oxford University Press.

²⁵ Zob. R.D. Sorkin, *First Steps with Causal Sets*, [w:] *General Relativity and Gravitational Physics (Proc. of 9th Italian Conf. on General Relativity and Gravitational Physics, Capri, 25-28 IX 1990)*, ed. R. Cianci, R. de Ritis, M. Francaviglia, G. Marmo, C. Rubano, P. Scudellaro, Singapore 1991, World Scientific, s. 69 i nast.

matycznej nienaturalności lorentzowskiej sygnatury $(- + + +)$, ponieważ wybór orientacji \mathbf{M}^4 nie znajduje stosownego, prostego wyjaśnienia fizycznego (nie jest jasne, dlaczego akurat taka sygnatura musi być przyjęta jako jedyna adekwatna). Spodziewalibyśmy się, że pełna teoria czasoprzestrzeni nie tylko pozwoli zdefiniować naturalną metrykę wynikającą z fundamentalnej struktury przyczynowej zdarzeń, ale wyjaśni także w prosty sposób, dlaczego wspomniana sygnatura ma taką właśnie postać. Założenie o „efektywnym przybliżeniu” oznacza zatem, iż postulujemy *dyskretny, kauzalny porządek pra-stanów* C o odpowiednio bogatej strukturze, z której można efektywnie odzyskać gładką geometrię lorentzowską \mathbf{M}^4 , tzn. $C \approx \mathbf{M}^4$. (W tym punkcie całkowicie rezygnujemy już z ciągłości monadologicznego modelu Leibniza).

Przejście do dyskretnej struktury kauzalnej wymaga oczywiście radykalnej zmiany języka teorii, ale — co ciekawe — wcale nie staje się on nieintuicyjny, a wręcz przeciwnie. W swym słynnym wykładzie habilitacyjnym z 1854 r. Bernhard Riemann wypowiedział się dokładnie w tym duchu: z dwóch konstrukcji matematycznych, „rozmaitości dyskretnej” (*discrete Mannigfaltigkeit*) z „elementami” oraz „rozmaitości ciągłej” (*stetige Mannigfaltigkeit*) z „punktami”, to właśnie pierwsza jest lepiej intuicyjnie uchwytywalna. Co więcej, to właśnie Riemann podkreślił przy tej okazji, iż w przypadku drugiej z nich relacje metryczne (*Massverhältnisse des Raumes*) są dołączone, zewnętrzne, w pierwszej zaś zawarte już w samej jej konstrukcji (*in dem Begriffe*),²⁶ co możemy rozumieć jako jej naturalną, konceptualną przewagę. Części (*Theile*) czyli kwanty (*Quanta*) rozmaitości ciągłej mogą być porównywane jedynie poprzez *pomiar* (*Messung*), natomiast kwanty rozmaitości dyskretnej dzięki *liczeniu* (*Zählung*), co daje nam automatycznie „wewnętrzną metrykę” samej przestrzeni.²⁷ W przypadku kosmologii kwantowej, konstruowanej na tej ostatniej, naturalnym językiem staje się algebra i kombinatoryka wraz z czymś, co moglibyśmy w duchu Leibniza określić jako „ontologikę” (abstrakcyjną teorię porządku, interpretowaną następnie ontologicznie i fizycznie). Opcja ta stanowi alternatywę dla prób konstruowania ogólnie kowariantnej kwantowej teorii pola z zachowaniem pojęcia ciągłości: nawet Einstein, oddany do końca próbom zbudowania tej ostatniej, miał poważne wątpliwości co do sensowności używania samego pojęcia „fizycznego kontinuum”.²⁸

²⁶ B. Riemann, *Ueber die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen*, § 1, Abhandlungen der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften in Göttingen, Math. Classe, Bd. 13, Göttingen 1868, s. 135. Zob. także: R.D. Sorkin, *Causal Sets: Discrete Gravity*, [w:] *Lectures on Quantum Gravity (Series of the Centro de Estudios Científicos)*, ed. A. Gomberoff, D. Marolf, Berlin — New York 2005, Springer, s. 307 i nast.

²⁷ Tamże: „...bei einer discreten Mannigfaltigkeit das Princip der Massverhältnisse schon in dem Begriffe dieser Mannigfaltigkeit enthalten ist”. Fragment cyt. też przez R.D. Sorkina, *Causal Sets...*, s. 307.

²⁸ Zob. np. J. Stachel, *The Other Einstein: Einstein Contra Field Theory*, „Science in Context”, 1993, vol. 6, nr 1, s. 275-290.

Najprostszym punktem wyjścia kosmologicznego, kauzalnego modelu opartego na „serii” C dyskretnych elementów jest pełna rekonstrukcja geometrii M^4 w oparciu o ustaloną relację porządku $<$, taką, że jeśli dla dwóch zdarzeń x, y mamy: $x < y$, to wektor z x do y jest czasopodobny lub światłopodobny i skierowany w przyszłość. Okazuje się, że lorentzowska geometria płaskiej czasoprzestrzeni Minkowskiego da się przedstawić (zrekonstruować) jako taki porządek kauzalny, ale powstaje problem w przypadku OTW, pracującej na czasoprzestrzeniach zakrzywionych, w której podobna rekonstrukcja możliwa jest jedynie w zakresie wyznaczanym przez lokalny czynnik konforemny.²⁹ Aby uzyskać pełną informację o strukturze takiej zakrzywionej czasoprzestrzeni (tj. metrykę g_{ab}) zdefiniowanie samego porządku $<$ nie wystarczy, trzeba określić dodatkową miarę związaną z owym czynnikiem konforemny — może nią być element „miary objętościowej” w czasoprzestrzeni. Przy założeniu, że $C \approx M^4$, owa miara objętościowa nie musi być określana zewnętrznie przez pomiar, lecz przez naturalną procedurę *zliczania* bazowych elementów („pra-stanów”) tej przestrzeni i jest kowariantna (nie zależy od wyboru układu współrzędnych). Dokładnie w taki sposób konstruowany jest kosmologiczny model zbiorów kauzalnych zespołu Raphaela D. Sorkina z Syracuse University,³⁰ który ma bardzo interesujące właściwości z perspektywy interesującego nas tutaj zagadnienia blokowości serii i dynamiki. Przede wszystkim opiera się on na dyskretnych B -ciągach (bazą są stany porządkowane kauzalnie relacją $<$, najbardziej zaś naturalnym językiem pomocnym w ewentualnej kwantyzacji jest tu kwantowy formalizm sumowania po historiach), a zatem stereotypowo kwalifikowałby się w punkcie wyjścia do kategorii kosmologii, które „zamrażają” dynamikę, niezależnie od swojej „blokowości” w sensie omówionym powyżej. Należy zbadać, w jakim sensie jest on „blokowy” i czy rzeczywiście potrafi zachować dynamikę na podstawowym poziomie, jak widać to na przykładzie ontologii Leibniza.

W modelu podstawową rolę pełni wspomniany *zbiór kauzalny* (*kausset*) C o strukturze skierowanego grafu (można go reprezentować za pomocą diagramów Hassego), który jest posetem — lokalnie skończonym zbiorem z porządkiem $<$, spełniającym trzy warunki:³¹

$$(1) \quad \text{przechodność} \\ (\forall x, y, z \in C) [x < y < z \Rightarrow x < z]$$

²⁹ Więcej na ten temat w: R.D. Sorkin, *Causal Sets...*, s. 306 i nast.

³⁰ Zob. np. L. Bombelli, J. Lee, D. Meyer, R.D. Sorkin, *Space-Time as a Causal Set*, „Physical Review Letters”, 1987, vol. 59, nr 5, s. 521-524; R.D. Sorkin, *First Steps...*, s. 68-90; R.D. Sorkin, *Spacetime and Causal Sets*, [w:] *Relativity and Gravitation: Classical and Quantum (Proc. of the SILARG 7th Conf., Cocoyoc/Mexico, 2-8 XII 1990)*, ed. J.C. D’Olivo, E. Nahmad-Achar, M. Rosenbaum, M.P. Ryan, L.F. Urrutia, F. Zertuche, Singapore 1991, World Scientific, s. 150-173; R.D. Sorkin, *Causal Sets...*

³¹ Więcej np. w: R.D. Sorkin, *Causal Sets...*, s. 309 i nast.

- (2) *przeciwzwrotność*
 $(\forall x \in C) [x \not\prec x]$
- (3) *lokalna skończoność* (jako warunek dyskretności kausetu)
 $(\forall x, z \in C) [kard \{y \in C \mid x \prec y \prec z\} < \infty]$ (gdzie *kard* oznacza moc).

Posługując się kausetem stanów bazowych możemy używać rozmaitych określeń, np. mówić, że jeśli $x \prec y$, to x poprzedza y , x jest przodkiem y , y jest potomkiem x lub x leży w przeszłości y . W przypadku, gdy $x \prec y$ i nie istnieje taki stan z , że: $x \prec z \prec y$, wtedy możemy mówić, że $x \prec y$ jest łączem (*link*), a także: x jest rodzicem y , y jest dzieckiem x . Element maksymalny kausetu to taki, który nie leży w przeszłości (nie jest przodkiem) żadnego innego. Definiujemy następnie *łańcuch* jako liniowo uporządkowany podzbiór C , *antyłańcuch* zaś jako podzbiór C całkowicie nieuporządkowany (tj. taki, w którym między dowolną parą elementów nie zachodzi relacja \prec). Dowolną wznoszącą sekwencję elementów w kausecie, które wiążą łąca, nazywamy *ścieżką*. Dodatkowo jeszcze potrzebna jest definicja *łodygi* (*stem*) kausetu, którą jest każdy jego skończony podzbiór S taki, że: $x \prec y \in S \Rightarrow x \in S$. Ponieważ „miara objętościowa” nie może być wydobyta z geometrii \mathbf{M}^4 , zawierającej jedynie informacje o kauzalnym porządku zdarzeń, zatem musimy teraz wprowadzić dodatkowy postulat oparty na założeniu $C \approx \mathbf{M}^4$, głoszący, iż objętość danego obszaru czasoprzestrzeni przybliżonego odpowiednim kausetem może być odpowiednio zliczona (w sensie Riemannowskim) i równa się liczbie elementów tego kausetu. Taki prosty model ma już w punkcie wyjścia bardzo obiecujące właściwości (analogiczne do kauzalnych serii stanów monad Leibniza): wyznacza czy koduje relacyjnie na fundamentalnym poziomie topologię i metrykę rozmaitości \mathbf{M}^4 , a także ugruntowuje i w tym sensie wyjaśnia fizycznie (kauzalnie) adekwatność jej sygnatury $(- + + +)$. Konkretnie konsekwencje fizyczne takiej dyskretyzacji czasoprzestrzeni są jednak jeszcze ciekawsze: odpowiednio skonstruowany model kausetów dostarcza — już bez dodatkowych założeń dynamicznych — algorytmu zliczania informacyjnej entropii czarnych dziur (zarówno w stanie równowagi, jak i nierównowagi), co daje przewidywania podobne do wzoru Bekensteina–Hawkinga.³² Co więcej, teoria kausetów jako jedyna przewiduje poprawnie, wychodząc przecież od mikrostruktury czasoprzestrzeni, rząd wielkości tzw. stałej kosmologicznej (10^{-120}) jako globalnej wielkości czysto kwantowej oraz zależne od czasu jej fluktuacje.³³ W teorii tej najbardziej interesujący z rozważanej tu perspektywy jest jednak nie tyle jej aspekt czysto kinematyczny, ile przede wszystkim dynamiczny.

Kausety nie są dane w całości, lecz podlegają rozwojowi czy ewolucji zwanej *sekwencyjnym wzrostem* (*growth*) lub „kosmologiczną akrecją”, która polega na tym,

³² Pokazał to w swojej rozprawie doktorskiej Djamel Dou (obecnie prof. Uniwersytetu Króla Sauda w Rijadzie / Arabia Saudyjska): *Causal Sets, a Possible Interpretation for the Black Hole Entropy and Related Topics* (Scuola Internazionale Superiori di Studi Avanzati, Trieste 1999).

³³ Zob. R.D. Sorkin, *Spacetime and Causal Sets*.

iz nowe elementy „rodzą się” w odpowiedniej sekwencji (są więc kauzalnie powiązane ze swoimi przodkami), co powoduje przejście od jednego cząstkowego kausetu do innego.³⁴ Sekwencyjność oznacza, iż w każdym poszczególnym kroku rodzi się nowy element (jako maksymalny) tak, że można zastosować tu procedurę naturalnego znakowania wszystkich elementów taką, że: $x < y \Rightarrow \text{znak}(x) < \text{znak}(y)$, przy czym znakowanie najwygodniej przeprowadzić za pomocą liczb całkowitych $\{0, 1, 2, 3, \dots, n-1\}$. Wzrost nie jest procesem deterministycznym, lecz stochastycznym (przed kwantyzacją, tzn. klasycznie stochastycznym typu Markowa) i polega na tym, że nowy, n -ty element maksymalny „rodząc się” musi wybrać jedną z łodyg kausetu, $S \subseteq C_n$, od której jest kauzalnie zależny (wszystkie elementy S są wtedy jego przodkami). Najlepiej przedstawić cały proces wzrostu za pomocą posetu \mathcal{P}_c wszystkich skończonych kausetów (każdy element \mathcal{P}_c jest wtedy nie tyle konkretnym kausetem, co całą izomorfizmową klasą abstrakcji skończonych kausetów) powiązanych kauzalnymi łączami — wtedy wzrost prowadzący do kausetu C_n z maksymalnym elementem n można opisać przez wskazanie (zawsze) skończonej ścieżki w \mathcal{P}_c , poczynając na elemencie pustym.³⁵ Każda sekwencja wzrostu jest zatem przejściem $C_n \rightarrow C_{n+1}$, jego dynamika zaś jest po prostu określona za pomocą odpowiednich *prawdopodobieństw* (w ogólności: amplitud) *przejścia* $\tau(C_n \rightarrow C_{n+1})$, czyli wyborów łodyg (kauzalnych historii) w \mathcal{P}_c . W przypadku, gdy mówimy o kausetach rosnących klasycznie, opisanie dynamiki w takim modelu kosmologicznym jest analogiczne do modelu Leibniza: musimy znać prawo (*lex*) dynamiki, które pozwala określać te prawdopodobieństwa warunkowe, spełniające prostą regułę sumy Markowa i zachowujące pewne niezmienniki charakteryzujące ścieżki w \mathcal{P}_c , w których nowe elementy się rodzą (są to pewne globalne „stałe wiązania”). Dla pełnego opisu wzrostu kausetu jako procesu stochastycznego same prawdopodobieństwa τ jednak nie wystarczą, dlatego traktując je jako „surowe dane” musimy zbudować odpowiednią algebrę dla wybranej przestrzeni próbkowania Ω (o niej poniżej) — w tym przypadku jest to σ -algebra \mathcal{R} na Ω (określająca możliwe pytania dopuszczone przez „prawo dynamiki” w \mathcal{P}_c) oraz miara prawdopodobieństwa μ , której dziedziną jest \mathcal{R} (określająca nieujemne, rzeczywiste wartości jako sensowne odpowiedzi). Teraz kluczową kwestią jest zauważenie, iż tak jak „prawo serii” u Leibniza w pełni wyczerpuje całą o niej informację (łącznie ze związkami przyczynowymi między wszystkimi jej przygodnymi stanami), tak też miara μ , a dokładniej trójka $(\Omega, \mathcal{R}, \mu)$, jest prawem dynamicznym wzrostu kausetu i wyczerpuje całą informację *a priori* o historii-kausecie C (zawierając informację o sensownych pytaniach i odpowiedziach w odniesieniu do niego).³⁶ Powyższy schemat konstrukcji teorii wskazuje wyraźnie, że historie rosną

³⁴ Szczegółowa prezentacja dynamiki kausetów: D.P. Rideout, R.D. Sorkin, *Classical Sequential Growth Dynamics for Causal Sets*, „Physical Review” D, 1999, vol. 61, 024002.

³⁵ Przykład takiego abstrakcyjnego posetu \mathcal{P}_c można prześledzić w: tamże, s. 024002-3.

³⁶ Więcej na ten temat i tzw. predykatów łodygowych w teorii kausetów: G. Brightwell, H.F. Dowker, R.S. García, J. Henson, R.D. Sorkin, *General Covariance and the ‘Problem of Time’ in a*

w nim klasycznie, podobnie do ciągłego „wzrostu leibnizjańskiego”, tyle że tu mamy sekwencyjność i dyskretność — centralną rolę pełni także *rzeczywista, fizyczna przyczynowość* oraz *rzeczywista dynamika* procesu. Podstawowe pytanie brzmi teraz: na czym polega ontologicznie rozumiana ogólna kowariantność kausetu, a więc (zgodnie z poprzednimi ustaleniami) jego — również ontologiczna — blokowość? Jak należy rozumieć jego dynamikę, „wzrost”?

Zauważmy najpierw, że wspomniana dynamika — mimo że rozważamy tylko proces klasyczny, przed kwantyzacją! — nie jest dynamiką „w czasie”, ale „przed czasem”, gdyż to sam wzrost kausetów *jest czasem*, o czym łatwo zapomnieć.³⁷ Na poziomie sieci kauzalnej C świat fizyczny nie jest 3+1-wymiarowy, lecz *wyłącznie* 4-wymiarowy, nie ma w nim żadnej „ewolucji przestrzeni w czasie” i jako taki musi być konsekwentnie traktowany³⁸ (nie możemy przenosić prostych uprzestrzeniających intuicji makroskopowych na mikrostrukturę elementów, co zresztą odnosi się też do wyobrażeń na temat monad Leibniza, które są jako takie nieprzestrzenne i bezczasowe). Ponieważ sekwencyjny wzrost kausetu (narodziny elementów) jest przedczasowy, przeto — jak można było się spodziewać — pogwałcona jest zdroworoządkowa intuicja o samej czasowości ewolucji, co już w punkcie wyjścia wymusza na nas posłużenie się pewnym nieintuicyjnym z tego punktu widzenia uogólnieniem pojęcia „dynamiki”. U Leibniza dynamika serii to jej globalne, będące „siłą”-„dążeniem” prawo (*lex seriei = vis primitiva = forma*), „prawo kauzalnej historii”; w indeterministycznej ewolucji kausetu globalnym prawem jest ustalona miara μ , którą można uznać za dobry odpowiednik „tendencji” czy „dążności” w kosmosie Leibniza. Aby uniknąć nieporozumień powinniśmy zatem mówić o „wzroście”, ujmując go w cudzysłów — jest to „wzrost” niezakładający pierwotnego czasu! Fakt ten jednak, podobnie jak w systemie Leibniza, nie powoduje automatycznie, że każdy stan zatem jest „logicznie konieczny”: takie zdroworoządkowe wynikanie po prostu nie zachodzi.

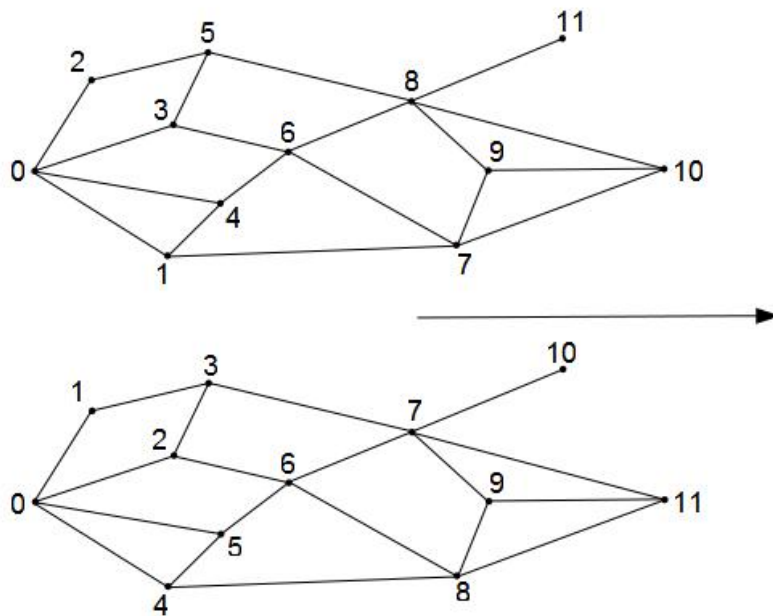
W przypadku kausetów zasada ogólnej kowariancji musi posiadać odpowiednią postać ze względu na specyfikę dyskretności posetów i relacji $<$ oraz dynamikę stochastyczną: jest to „dyskretna ogólna kowariancja”. Jej istotą jest wymóg, by proce-

Discrete Cosmology, [w:] *Correlations (Proc. of the ANPA 23th Conf.*, Cambridge, 16-21 VIII 2001), ed. K.G. Bowden, London 2002, ANPA, s. 1-17. Ściśle rzecz biorąc winniśmy oczywiście mówić, że wzrost kausetów to *czasoprzestrzeń*, a nie sam czas.

³⁷ Tamże. Zob. też: D.P. Rideout, R.D. Sorkin, *Classical Sequential...*, s. 024002-2.

³⁸ R.D. Sorkin, *Relativity Theory Does Not Imply that the Future Already Exists: A Counterexample*, [w:] *Relativity and the Dimensionality of the World*, ed. V. Petkov, s. 157. W latach 50. zarówno Dirac, jak i R. Aronovitt, S. Deser i C. Misner, pracując nad hamiltonowskim sformułowaniem OTW (wzmiankowany wcześniej formalizm Diraca oraz ADM), odkryli, że w przypadku dynamicznego sformułowania OTW jedynym, co może „zmieniać się” w klasycznym znaczeniu tego słowa nie są „odległości” czasoprzestrzenne, lecz jedynie odległości w 3-wymiarowej przestrzeni — spowodowało to, że nawet Dirac zaczął wątpić, czy jest sensowne zachowanie idei czterowymiarowości w fizyce (zob. J. Barbour, *The End of Time*, s. 2 i 167). W modelu kausetowym próbuje się zachować tę 4-wymiarowość świata *oraz* uogólnioną dynamikę.

dura znakowania elementów kasetu była „czystym cechowaniem”, tzn. by znakowanie było całkowicie nieistotne dla miary μ na σ -algebrze \mathcal{R} i prawdopodobieństw przejścia $\tau(C_n \rightarrow C_{n+1})$. Gdyby tak nie było, wtedy faktycznie pewien „idealny czas”, w którym zachodziłby wzrost kasetu, musiałby zostać potraktowany jako wyróżniony (absolutny). Ponieważ kaset już z definicji nie wzrasta w żadnym zewnętrznym czasie, przeto znakowanie nie powinno być ustalane przez żadne tło, lecz jedynie ograniczane prostą zasadą samego wzrostu: „wewnętrzną czasowością”, *inner temporality* (każdy element maksymalny rodzi się albo w przyszłości wszystkich już istniejących, albo nie jest z nimi powiązany przyczynowo). Rysunek pokazuje, w jaki sposób model kasetowy uwzględnia jedynie *obiektywne* związki przyczynowe między bazowymi elementami i uniezależnia dynamikę od konkretnej (wyróżnionej) perspektywy.



Ilustracja dyskretnej ogólnej kowariancji kasetu: znakowanie kolejności narodzin elementów nie ma znaczenia (znika z równań dynamiki, tzn. nie wpływa na miarę μ), o ile tylko zachowuje zasadę „wewnętrznej czasowości” kasetu — w tym sensie jest ono „czystym cechowaniem”. Wybór znakowania jest arbitralny dokładnie w takim sensie, jak wybór układu współrzędnych w OTW. Strzałka pokazuje kierunek wzrostu kasetu (strzałka czasu), choć sam wzrost nie zachodzi „w czasie”.

Jest on zatem wyjątkowo dobrą ilustracją koncepcji Leibniza z cytowanego wcześniej szkicu listu do B. des Bossesa z 1712 r., w której rozróżnił on *scenografie* (perspektywy różnych obserwatorów — układy odniesienia) oraz *ichnografie* ko-

smosu, czyli pewną obiektywną jego strukturę zawierającą układ przyczynowych relacji ujęty geometrycznie („*geometrica representatio unica est*”³⁹). Konsekwentnie, elementy „same w sobie” (jak „percepcje” Leibniza) nie posiadają żadnej „wewnętrznej tożsamości”, *haecceitas*, poza swoimi relacjami z innymi elementami — w tym sensie model kosmologiczny jest radykalnie relacyjny. Ostatecznie można więc dyskretną ogólną kowariancję nazwać „niezmienniczością pod przeznakiowaniem”, która gwarantuje, że jedyne fizycznie sensowne prawdopodobieństwa (czy ewentualnie amplitudy kwantowe) to te, które stowarzyszone są z izomorfizmowymi klasami równoważności kausetów.⁴⁰ Relacyjna obiektywność i lokalność związków przyczynowych w każdym C_n (związana z ważnym warunkiem tzw. *przyczynowości Bella*⁴¹) wraz z powyższą globalną kowariancją powodują, iż wszechświat modelowany na kausetach jest blokowy w wyróżnionym przez nas podstawowym (słabszym) sensie. Jest on *de facto* rozbudowanym, sieciowym i stochastycznie „rosnącym” w *przestrzeni logicznej B*-ciągiem, który mimo to zachowuje odpowiednio zdefiniowaną, fundamentalną dynamikę i makroskopowy upływ czasu. Globalne „Teraz” nie ma w nim jednak żadnego sensu, ani epistemologicznego, ani tym bardziej ontologicznego, gdyż jedyne „teraz”, związane z akrecją elementów, ma sens wyłącznie relacyjny i lokalny („teraz-i-tutaj”). Powstaje pytanie, czy owa słaba blokowość to jedyny sens blokowości kausetu C_n , skoro w analogicznym modelu Leibniza znajdujemy logiczny wymóg zupełności wszystkich serii, gwarantujący spójność wszechświata?

Okazuje się, że blokowość kausetów, pomimo ich sekwencyjnego „wzrostu”, ma również głębszy sens i to w dwóch aspektach związanych z podanym wcześniej warunkiem (1). Otóż abyśmy mogli w ogóle zdefiniować dynamikę dla dowolnego C_n , tzn. wskazać właściwą σ -algebrę \mathcal{R} i miarę μ z nałożonymi na nie fizycznymi warunkami⁴², musimy dysponować wyjściową przestrzenią próbkowania Ω , którą może być jedynie *pełna znakowana przestrzeń kausalna* $\Omega_{+\infty}$: zbiór wszystkich *pełnych (completed) oznakowanych kausetów*.⁴³ Przez kausety „pełne” należy rozumieć takie nieskończone posety kausalne, które powstałyby, gdyby proces wzrostu zakończył się (uległ spełnieniu) w nieskończoności, choć zarazem są i przeszłościowo i lokalnie skończone (każdy element n ma w nich zawsze skończoną liczbę przodków). A zatem dynamika w dyskretnym modelu kosmologicznym może być teraz zdefiniowana przez odpowiednią miarę μ_+ skonstruowaną na surowych prawdopodobieństwach τ (której dziedziną jest algebra \mathcal{R}_+). Ponieważ samo znakowanie nie ma fizycznego sensu, zatem potrzebujemy jeszcze, ściśle rzecz biorąc, konstrukcji przestrzeni ilorazowej: *pełnej nieznakowanej przestrzeni kausalnej* Ω_∞ , której

³⁹ G.W. Leibniz, *Szkic listu do B. des Bossesa*, s. 438.

⁴⁰ R.D. Sorkin, *Relativity Theory...*, s. 159.

⁴¹ D.P. Rideout, R.D. Sorkin, *Classical Sequential...*, s. 024002-6 i nast.

⁴² Bez nałożenia tych warunków otrzymujemy ogromną liczbę bezsensownych fizycznie modeli; w tym przypadku warunkami takimi są: „wewnętrzna czasowość”, „przyczynowość Bella” i „ogólna kowariancja”.

⁴³ Symbol '+' oznacza dalej oznakowanie kausetów.

elementami są kowariantne podzbiory $\Omega_{+\infty}$ (tj. takie, które o ile zawierają pewien znakowany kauset, zawierają też wszystkie jego dopuszczalne znakowania). A zatem możemy powiedzieć, że ogólna kowariancja teorii działa zarówno na poziomie kinematyki ($\Omega_{+\infty} \Rightarrow \Omega_{\infty}$), jak i dynamiki ($\mu_{+} \Rightarrow \mu$).⁴⁴

Widać jednak jedną zasadniczą właściwość całej konstrukcji: matematyczny formalizm teorii wymaga, by przestrzeń próbkowania była *zupełna* (w analogii do zupełności ciągłych serii Leibniza). Jeśli stochastycznie rosnące kausety nie będą *logicznie* zdefiniowane jako zupełne, wtedy nie można skonstruować praw dynamiki (miary μ) oraz sformułować ogólnej kowariancji dla dowolnego C_n ! Wynik ten może wydawać się paradoksalny, ponieważ z jednej strony kauset „rośnie” (a zatem logicznie rzecz biorąc pojawiają się nowe elementy maksymalne w jego łodygach), z drugiej zaś jego dynamika wymaga zupełności określonej przez jego pełną realizację w kauzalnej przyszłości. A zatem mamy tu ślad mocnej blokowości świata w sensie wskazanym przez warunek (1). Trudno nie zauważyć uderzającej analogii do sformułowania Leibniza, dla którego *zupełne pojęcie serii* (monady) jest zarazem jej *dynamiką*, *vis primitiva*. „Paradoks” ten bierze się prawdopodobnie z nieuprawnionego rozciągnięcia intuicji „wzrostu” i „stawania się” z obszaru czasowego na bezczasowy (tj. fundamentalny proces przyrody). W tym sensie uogólniona dynamika kausetów wymusza tutaj na nas modyfikację samej wyjściowej intuicji: „blokowość” jako wynik warunku (2) lub nawet (1) wcale nie oznacza automatycznie „zamrożenia” przyrody, nawet jeśli radykalnie „ulokálnia” i „urelacyjnia” czas, nie pozwalając na odzyskanie jakiegokolwiek idealnego czasu uniwersalnego.⁴⁵ Sensowne jest zatem mówienie w ontologii o „bezczasowym stawaniu się” czy „bezczasowej dynamice”; co więcej, jest to być może nawet konieczny kierunek ewolucji pojęć fizyki fundamentalnej.⁴⁶ Zdumiewające, że Leibniz uchwycił to napięcie w podstawach fizyki zanim jeszcze w pełni się ona rozwinęła.⁴⁷ Należy zgodzić się z opinią np. Jeremy’ego Butterfielda⁴⁸, iż terminologia „wzrostu”, „narodzin” elementów, etc. nie powinna sugerować tu ontologii prezentystycznej i wyobrażeń *A*-ciągów: *przeźren kausetów jest blokową przestrzenią następstwa* (zupełną, aczasową i zarazem indeterministyczną).

⁴⁴ R.D. Sorkin, *Relativity Theory...*, s. 160 (tam też więcej szczegółów).

⁴⁵ Por. np. F. Dowker, *Causal Sets and the Deep Structure of Spacetime*, [w:] *100 Years of Relativity. Space-Time Structure: Einstein and Beyond*, A. Ashtekar (ed.), Singapore 2005, World Scientific, s. 457 i nast., oraz G. Brightwell i in., *General Covariance...*

⁴⁶ Zob. analogiczne uwagi Michała Hellera w kontekście zupełnie innego modelu kwantowania grawitacji opartego na geometrii nieprzemiennej: tegoż, *Geneza czasu*, [w:] red. M. Heller, J. Mączka, *Czas...*, s. 77 i nast.; tegoż, *Ewolucja pojęć w fizyce*, [w:] tegoż, *Filozofia i Wszechświat. Wybór pism*, Kraków 2008, Universitas, s. 523 i nast.

⁴⁷ Warto zauważyć, że mamy tu związek między ukrytą rolą probabilistyki („przygodności stanów”) w kosmologii Leibniza a definiowaniem uogólnionej dynamiki przez miarę probabilistyczną w modelu kausetowym.

⁴⁸ J. Butterfield, *Stochastic Einstein Locality Revisited*, „British Journal for the Philosophy of Science”, 2007, vol. 58, nr 4, s. 859.

Drugi aspekt blokowości ujawnia się w związku z wymogiem kwantyzacji kausetów, a więc zastąpienia wzrostu klasycznego „wzrostem kwantowym”. Najprostszym rozwiązaniem wydaje się tu skonstruowanie takiego modelu kausetowego, w którym prawdopodobieństwa przejścia τ zastąpione byłyby amplitudami kwantowymi, klasyczna zaś miara prawdopodobieństwa „miarą kwantową” $q\mu_+$ na przestrzeni próbkowania $\Omega_{+\infty}$ przez maksymalnie naturalne uogólnienie. Taka miara jest oczywiście — w przeciwieństwie do miary klasycznej — nieaddytywna ze względu na fakt, iż musimy uwzględnić czysto kwantowy efekt globalnej interferencji historii w $\Omega_{+\infty}$. Najbardziej odpowiednim kontekstem dla kwantowania historii kausalnych w powyższym modelu kosmologicznym wydaje się zatem kwantowy formalizm „sumy po drogach (historiach)” z odpowiednim dodatnim i hermitowskim funkcjonalem dekoherencji. Wiąże się z tym jednak kilka zasadniczych problemów, których nie będziemy tu omawiać: jednym z nich jest konieczność użycia pewnej uogólnionej, nieunitarnej postaci QM, co jest wymuszone przez dyskretną naturę kausetów, dla których nie da się skonstruować unitarnego równania ewolucji, reprezentującego proces kwantowy, tak jak da się to zrobić w przypadku dyfuzji stanu modelowanej na kontinuum (równanie Schrödingera).⁴⁹ Dodatkowo procedura przejścia w konstrukcji obrazu dynamicznego do kwantowej miary $q\mu_+$ i $q\mu$ znacznie się komplikuje, ponieważ punktem wyjścia są już amplitudy zespolone, a nie rzeczywiste prawdopodobieństwa z przedziału $[0, 1]$. Jednak najpoważniejszą przeszkodą (nie tyle techniczną, ile nawet konceptualną) okazuje się problem ze zrozumieniem sensu „przyczynowości Bella” w kontekście takiego kwantowego uniwersum budowanego na posetach, ponieważ zwykle uznaje się, że kwantyzacja wprowadza automatycznie do teorii pewien rodzaj nielokalności rozumianej (zwyczajowo) jako „działanie na odległość” (*action-at-a-distance*) w przestrzeni fizycznej. Skwantowanie kausetów w ramach pełnej teorii kwantowej grawitacji nie musi *a priori* prowadzić do żadnego typu nielokalności (rozumianej dosłownie), ale musi oczywiście odtwarzać wszystkie korelacyjne przewidywania QM dla lokalnych pomiarów w fizycznej czasoprzestrzeni. Jeśli uznamy, iż prafenomenem kwantowym (i prafenomenem mechaniki w ogóle) jest *globalna, formalna nieseparowalność stanów fizycznych*⁵⁰ i jednocześnie zależy nam na zachowaniu fizycznej lokalności tych stanów i oddziaływań bez żadnych momentalnych „kolapsów funkcji stanu” na hiperpowierzchniach w czasoprzestrzeni oraz sygnalizacji nadświetlnej, wtedy zmuszeni jesteśmy poszukiwać immanentnej kontekstualności QM poza standardowo rozpatrywaną nielokalnością jako *action-at-a-distance* („upiorną”, by użyć określenia Einsteina). I właśnie w tym miejscu blokowość modelu kosmologicznego w sensie sformułowanego warunku (1) wkracza po raz kolejny, będąc bliską analogią do modelu Leibniza, u którego właśnie

⁴⁹ Więcej na ten temat: X. Martin, D. O'Connor, R.D. Sorkin, *Random Walk in Generalized Quantum Theory*, „Physical Review” D, 2005, vol. 71, 024029.

⁵⁰ Więcej na ten temat w: M. Woszczyk, *Ukryta całość przyrody a mikrofizyka*, Poznań 2010, Wyd. Naukowe Instytutu Filozofii UAM.

zagwarantowanie pełnej harmonii związków (*spójności*) między historiami-seriami w *jednym* wszechświecie (z wykluczeniem „wieloświata”) wymaga wprowadzenia ich logicznej *zupełności*. Paradoksalnie, wbrew częstej opinii, iż QM wprowadza klasyczną intuicję absolutnego czasu i prezentyzmu, okazuje się, że właśnie pełna kwantyzacja przestrzeni historii *C* wymusza na nas ontologię WB w jeszcze większym stopniu niż OTW!

Aby odzyskać więc w modelu kosmologicznym przewidywania kwantowomechaniczne, musimy wprowadzić globalne interferencje historii, co — z przyczyn formalnych — wymaga założenia przyszłościowej zupełności kausetów. Co prawda kausety z definicji narastają na swoich łodygach z zachowaniem pełnej relatywistycznej lokalności, ale miara kwantowa musi być zdefiniowana globalnie dla całych historii: można mówić tu o kwantowych ukrytych zmiennych, którymi są po prostu całe kauzalne historie budujące czasoprzestrzeń. W tym przypadku te ukryte zmienne są *globalnie kontekstualne* w takim sensie, iż „ukrytym kontekstem” każdego zdarzenia kwantowego jest cała jego zarówno przeszłościowa, jak i przyszłościowa kauzalna historia w *C*. Ta opcja teoretyczna wynika z samej teorii miary kwantowej, konkretnie pewnej właściwości postulowanego funkcjonu dekoherencji, która jest równoważna spełnianiu uniemożliwiającej komunikację nadświetlną tzw. nierówności Tsirelsona (w przeciwieństwie do mocniejszych, łamanych nierówności Bella, których jest ona uogólnieniem).⁵¹ Oznacza to, iż chociaż w kontekście grawitacji kwantowej nie ma już sensu mówienie o zachowaniu klasycznej, lokalnej przyczynowości, to jednak nadal ma sens mówienie o globalnej (uogólnionej) przyczynowości kwantowej i globalnych „ukrytych zmiennych”. Rozpoznanie ich fizycznej natury wymaga dalszej pracy — choćby w kontekście teorii miary kwantowej, która jest naturalną podstawą programu pełnej kwantyzacji kausetów.

Podsumowując: omówiliśmy projekt relacyjnego modelu kosmologicznego, w którym bazą są dyskretne stany powiązane rzeczywistymi związkami przyczynowymi i modelowane za pomocą zbiorów z częściowym porządkiem, zachowujący dynamikę i fizyczną lokalną czasowość. Model ten opisuje wszechświat, który jest blokowy w sensie warunku (1), „formalnej zupełności historii”, oraz (2), „ogólnej kowariancji”, a mimo to opiera się na logicznym czy bezczasowym „stawianiu się” („narodzinach” kolejnych elementów) i jest lokalnie indeterministyczny (elementy „rodzą się” przypadkowo). Model ten jest dyskretnym, kwantowym odpowiednikiem metafizycznego modelu Leibniza, gdyż zachowuje pewne jego właściwości, takie jak dwuaspektową (formalną) „blokowość”, bezczasową dynamikę, spójność wszechświata gwarantowaną przez globalną zupełność historii, „przygodność” poszczególnych stanów i realność związków przyczynowych. Choć powstał z intencją zacho-

⁵¹ B.S. Cirel'son, *Quantum Generalisations of Bell's Inequality*, „Letters in Mathematical Physics”, 1980, vol. 4, s. 93-100. Więcej w kontekście formalizmu „spójnych historii” i warunku „kwantowego ekranowania” w: D. Craig, F. Dowker, J. Henson, S. Major, D. Rideout, R.D. Sorkin, *A Bell Inequality Analog in Quantum Measure Theory*, „Journal of Physics” A, 2007, vol. 40, nr 3, s. 501-523.

wania „upływu czasu”, to jednak operuje w całkowicie bezczasowej przestrzeni blokowej, dając „czas” i „przestrzeń” jedynie efektywnie, jako zjawiska emergentne powyżej skali Plancka. Blokowe, kauzalne serie stanów w obu teoriach nie tylko nie muszą „zamrażać” czasu i całej fizyki, ale wręcz mogą zawierać uogólnioną dynamikę na najbardziej podstawowym poziomie; co więcej, wydaje się sensowne mówienie o *kwantowym wszechświecie blokowym z wewnętrzną dynamiką*. Jedyny warunek, który musimy zaakceptować, to oderwanie się od zdroworozsądkowych intuicji i wyobrażeń nie tylko na temat samej przyrody, ale też i postaci, jakie mogą przybierać teorie fundamentalne.