

M a r e k S z y d ł o w s k i, P a w e ł T a m b o r

## Relacjonizm i substancjalizm w kontekście teorii grawitacji i kosmologii\*

Jeśli byłbym zmuszony do podsumowania jednym zdaniem tego, co mówi mi kopenhaska interpretacja [mechaniki kwantowej], zdanie to brzmiałoby: „zamknij się i licz!”

N.D. Mermin, *What's Wrong with this Pillow?*

**Słowa kluczowe:** relacjonizm, substancjalizm, kosmologia, teoria grawitacji

### Wstęp

Powyższe słowa N. Davida Mermina w istocie nie są mottem artykułu, ale prowokującym punktem wyjścia. Pokażemy w pracy, że we współczesnej fizyce jest tendencja odchodzenia od takiego minimalistycznego podejścia („*Shut up and calculate!*”) na rzecz poważnej dyskusji filozoficznej nad podstawami fizyki i jej założeniami. Istnieje idea zbudowania całej fizyki w sposób relacyjny, co dotyczy także mechaniki kwantowej<sup>1</sup>. Istnieje tym samym przekonanie, że zbudowanie fizyki od samego początku relacyjnej – fizyki leibnizjańskiej – pozwoli przewyciężyć nagromadzone na jej gruncie problemy, jak połączenie mechaniki kwantowej z grawitacją czy zrozumienie natury czasu i przestrzeni. Matematyka (analiza matematyczna) poszła drogą Newtona, fizyka mierza drogą Leibniza. W wystąpieniu przedstawiamy różne aspekty sporu pomiędzy substancjalną a relacyjną koncepcją czasu i przestrzeni (czasoprzestrzeni).

Być może niewielu zdaje sobie dzisiaj sprawę, jak silna i aktualna jest dyskusja między różnymi stylami myślenia w fizyce współczesnej, która zdaje

---

\* Praca była finansowana przez grant NCN DEC-2013/09/B/ST2/03455. Jesteśmy szczególnie wdzięczni A. Krawcowi za dyskusje i trafne uwagi.

<sup>1</sup> Por. Rovelli 2006.

się być pochodną sporu między G.W. Leibnizem a Samuelem Clarkiem, oraz jak łatwo przenieść podstawowe zręby dawnego sporu na nowy grunt. Dla przykładu, wyodrębnić można we współczesnej kosmologii dwa istotnie różne style myślowe: substancjalny i matematyczno-geometryczny. Pierwszy jest w zasadzie domeną astronomii czy też kosmologii obserwacyjnej, gdzie interesujące są materialne obiekty, jak galaktyki, gromady galaktyk i ich struktury, które chcemy zobaczyć na własne oczy, tak jak widzimy nocne niebo. Wartościowa naukowo informacja nie posiada charakteru abstrakcyjnego, ale bardzo konkretny, a nasz materiał obserwacyjny składa się z obrazów obiektów. Używamy urządzeń, rejestrujących informacje od obiektów astronomicznych w różnych zakresach widma, które następnie przekształcamy w obrazy. Interesują nas tu przede wszystkim procesy fizyczne, na przykład to, że Wszechświat był kiedyś dostatecznie gorący, żeby mogły w nim przebiegać reakcje termojądrowe i w konsekwencji wyprodukowane zostało obserwowane dzisiaj rozpowszechnienie w odpowiednich proporcjach pierwiastków lekkich.

Styl drugi koncentruje się na abstrakcyjnym sposobie myślenia, konstruowania i opisu obiektów, jak i Wszechświata jako całości, w terminach równań. Ekspozuje się nie tyle obraz jako wizualizację obiektu, co abstrakcyjne równania opisujące zjawiska astrofizyczne, będące modelami tych zjawisk. Myślenie to jest charakterystyczne dla typowego teoretyka poznającego Wszechświat poprzez równania opisujące zachodzące w nim procesy. W takim podejściu Wielki Wybuch jest tzw. stanem osobliwym, w którym urywają się historie obserwatorów podróżujących po geodezyjnych czasopodobnych<sup>2</sup>.

Przypomnijmy na wstępie podstawowe tezy filozoficzne dotyczące natury czasu i przestrzeni według Newtona i Leibniza<sup>3</sup>. Zbiór poglądów nazywany substancjalizmem newtonowskim streszcza się w kilku zdaniach. Szywna, absolutna przestrzeń jest miejscem dla zachodzących w niej zjawisk. Możemy w tej przestrzeni wprowadzić sztywny układ odniesienia i do niego odwoływać się, gdy rozważamy procesy fizyczne zachodzące we Wszechświecie. Model Wszechświata nie jest traktowany jako czasoprzestrzeń, pewna integralna całość, ale jako odseparowane od siebie przestrzeń i czas. Są to skutki myślenia w teorii relatywistycznej kategoriami newtonowskimi. Przestrzeń w rozumieniu Newtona nie jest materialna (jak u Kartezjusza), nie jest substancją (bo nie ma własności kauzalnych oraz nie istnieje zupełnie niezależnie), nie jest własnością, bo może istnieć pusta przestrzeń. Jest rodzajem pseudo-substancji.

Według Leibniza zarówno absolutna przestrzeń Newtona, jak i czasoprzestrzeń Minkowskiego nie mogą być traktowane jako układy fizyczne. Ważne jest tu tzw. kryterium Leibniza: coś jest substancją fizyczną, jeśli nie tylko

<sup>2</sup> Por. Szydłowski, Tambor 2010.

<sup>3</sup> Por. Callender 2002.

oddziałuje, ale podlega oddziaływaniu. Kryterium tego nie spełniają przestrzeń Newtona i czasoprzestrzeń Minkowskiego. Czasoprzestrzeń w szczególnej teorii względności (STW) nie potrzebuje eteru jako wyjaśnienia nośnika światła, posiada ona natomiast jako taka swoiste własności, które sprawiają, że prędkość światła jest stała i niezależna od względnych ruchów. W ogólnej teorii względności (OTW) pole wyznaczone przez metrykę czasoprzestrzeni ma naturę dynamiczną, zatem własności świata można wyznaczyć poprzez relacje między układami fizycznymi.

Fizycy często posługują się terminem relacyjność. Mówią na przykład o relacyjnych teoriach fizycznych. Relacyjność ta jest jednak rozumiana w bardzo różny sposób. Inne jest rozumienie Barboura i Bertottiego<sup>4</sup>, a jeszcze inne Smolina i Rovelliego<sup>5</sup>. To, co jednak ich wszystkich łączy, to percepcja idei Leibniza jako poglądu, że zjawiska fizyczne przejawiają się w relacjach między obiektami fizycznymi, oraz że nie istnieje absolutny czas i przestrzeń. Trudno jest wykazać, w jaki sposób relacyjność rozumiana na sposób Leibniza historycznie wpłynęła na przykład na Einsteina teorię czasoprzestrzeni. Trzeba brać pod uwagę także Kartezjusza program redukcji fizyki do geometrii, a geometrii do algebry, z którym Leibniz polemizował. Z pewnością bezpośrednim podłożem dla postrzegania czasu i przestrzeni jako relacji porządku były poglądy Arystotelesa na temat przestrzeni, która jest zbiorem położeń ciał (zbiorem miejsc), i poglądy Spinozy na naturę czasu, który traktował on właśnie jako relację porządkującą zdarzenia.

## Historyczne i aktualne znaczenie debaty między Leibnizem i Newtonem

Celem tego paragrafu jest podsumowanie Leibniza poglądów na temat natury przestrzeni i czasu, oraz próba pokazania ich możliwego i rzeczywistego wpływu na obecny kształt sporu między relacjonizmem i substancjalizmem.

Wiele ze swoich przekonań naukowych, metanaukowych i filozoficznych Leibniz prezentował w postaci dyskusji i krytyki współczesnych sobie uczonych. Te debaty toczyły się często drogą korespondencyjną. Swoje poglądy na naturę przestrzeni i czasu Leibniz zawarł przede wszystkim w słynnej korespondencji z Samuelem Clarkiem, uczniem Izaaka Newtona<sup>6</sup>. W pracy *The Anti-barbarian Physicist* Leibniz wyraził swój krytyczny stosunek do Newtona teorii powszechnego ciężenia. Krytyka Newtona przeprowadzona

<sup>4</sup> Por. Barbour 1992; Barbour, Bertotti 1982.

<sup>5</sup> Por. Rovelli 1996.

<sup>6</sup> Por. Leibniz, Clarke 1956.

była tu z punktu widzenia dwóch nadrzędnych założeń fizyki mechanistycznej: 1) żadne ciało nie może oddziaływać na inne w inny sposób niż w postaci bezpośredniego kontaktu, 2) wyjaśnienia o charakterze fizycznym winny odwoływać się ostatecznie do fizycznych własności ciał (kształt, rozmiar, ruch). W przekonaniu Leibniza Newton łamał te założenia, dopuszczając oddziaływanie między ciałami na odległość oraz tłumacząc to oddziaływanie istnieniem siły grawitacyjnej jako podstawowej własności ciał.

W rekonstrukcji poglądów na naturę czasu i przestrzeni trzeba odróżnić spór na temat statusu ontologicznego przestrzeni i czasu w terminach „absolutny – relacyjny” od sporu w terminach „substancjalny – relacyjny”. Ciekawe, że w dyskusji z Clarkiem Leibniz nie korzysta z wypracowanej przez siebie teorii metafizycznej – teorii monad<sup>7</sup>. W krytyce koncepcji przestrzeni absolutnej wykorzystuje natomiast dwie zasady: racji dostatecznej i tożsamości, a wywód ma charakter teologiczny. Pierwsza argumentacja przebiega następująco: według teorii Newtona przestrzeń absolutna ma tę własność, że jej części-obszary są jakościowo nierozróżnialne. Bóg, stwarzając świat, powinien mieć rację przemawiającą za tym, by stworzyć go w tej a nie innej części przestrzeni. Skoro jednak żadna część przestrzeni nie jest wyróżniona, racji takiej Bóg nie mógł mieć. Bóg nie może działać bez istnienia racji swego działania. Skoro jednak świat istnieje, to przestrzeń nie ma charakteru absolutnego. Argumentacja oparta na zasadzie tożsamości odwołuje się do eksperymentu myślowego: Bóg mógłby w absolutnej przestrzeni dokonać „przesunięcia” stworzonego przez siebie wszechświata o dowolną odległość w dowolnym kierunku bez zmiany jego struktury. Niestety, będąc konsekwentnym, trzeba stwierdzić, że nie można zaobserwować takiego efektu Bożego działania. Nie dokonała się zatem żadna zmiana, którą można zaobserwować. „*When there is no change that can be observed, there is no change at all*”, konkluduje Leibniz [AG 340–341]. Istotne w tym momencie jest to, że rozumowanie z zasady tożsamości stosuje się w istocie w przypadku tzw. argumentu dziury, kluczowego we współczesnej dyskusji nad możliwą absolutną naturą przestrzeni i czasu.

Formułując argumenty krytyczne na temat koncepcji absolutnej przestrzeni, Leibniz równocześnie proponuje teorię relacyjną przestrzeni i czasu. Traktowanie przestrzenności i czasowości jako własności współwystępowania i współnastępowania po sobie znaczy innymi słowy, że dla istnienia w przestrzeni i czasie nie musi istnieć ontologicznie nadrzędna lub logicznie uprzednia wobec ciał fizycznych struktura. Podstawowa teza Leibniza jest taka, że przestrzeń i czas są natury idealnej. Należy podkreślić, że swoją teorię opiera nie tylko na tezie o relacyjności czasu i przestrzeni, ale na głoszonej przez siebie metafizyce: realne są tylko substancje, natomiast relacje ujmuje umysł. Trzeba

---

<sup>7</sup> Por. Broad 1981.

do tego dodać jeszcze to, że w przekonaniu Leibniza o przestrzeni i czasie można mówić jako o fenomenach. Tutaj konieczne jest już posługiwanie się teorią monad. Mówiąc językiem współczesnym, można powiedzieć, że zbiór relacji przestrzennych i czasowych na poziomie ujmowanego mentalnie świata zjawiskowego (świata fenomenów) jest emergentny w stosunku do fundamentalnego poziomu własności monad. Leibniz jest zatem idealistą w kwestii natury przestrzeni i czasu: nie są to ani substancje, ani własności substancji; przestrzeń i czas są strukturą, którą mentalnie „nanosimy” na świat zjawisk.

Powtórzmy, że celem naszej pracy jest umieszczenie klasycznego sporu we współczesnym kontekście. Relacyjna ontologia czasu i przestrzeni Leibniza da się sprowadzić do dwóch aksjomatów: 1) identyfikacja obiektów w przestrzeni dokonuje się poprzez relacje odległości między nimi; 2) te punkty materialne są stałe, natomiast tym, co podlega zmianie, jest odległość. Można zatem powiedzieć, że zmiana fizyczna implikuje zmianę ontologiczną. Poza tym zauważmy, że proste aksjomaty ontologiczne fizyki Leibniza nie wyróżniają żadnej geometrii, nic nie mówią o liczbie wymiarów przestrzeni. Podobnie do istoty ontologii relacyjnej nie włącza się dynamicznych własności obiektów fizycznych. Zarówno wybór współrzędnych, jak i pól, które składają się na czasoprzestrzenne relacje, jest teoretycznie arbitralny, co dopuszcza swobodę modelowania i testowania układów fizycznych. Potwierdza to nasze obserwacje i tezę o *leibnizjańskim* charakterze fizyki współczesnej<sup>8</sup>.

## Dwa podstawowe schematy pojęciowe i myślowe w kosmologii XX wieku

Dobrym narzędziem do uporządkowania dyskusji dotyczących ontologii czasoprzestrzeni jest typologia Gołosza<sup>9</sup>. Poddaje on charakterystyce i naukowej identyfikacji cztery typy koncepcji czasu i przestrzeni. Mamy zatem koncepcje: a) substancjalistyczno-absolutystyczne, gdzie czas i przestrzeń (czasoprzestrzeń) są równorzędne ontycznie w stosunku do świata fizycznego oraz istnieje wyróżniony fizycznie układ odniesienia (Newton), b) substancjalistyczno-relatywistyczne: czas i przestrzeń (czasoprzestrzeń) są co najmniej równie pierwotne ontycznie jak świat fizyczny, lecz pomimo to nie istnieje wyróżniony fizycznie układ odniesienia, c) koncepcje relacjonistyczno-absolutystyczne, w których czas i przestrzeń (czasoprzestrzeń) dają się zredukować do pewnych relacji zachodzących pomiędzy obiektami świata fizycznego i istnieje wyróżniony fizycznie układ odniesienia, wreszcie d) relacjonistyczno-relatywistyczne: czas i przestrzeń

<sup>8</sup> Por. Vassallo, Esfeld 2016.

<sup>9</sup> Por. Gołosz 1995.

są redukowalne do pewnych relacji pomiędzy obiektami świata fizycznego, ale jednocześnie nie istnieje żaden wyróżniony fizycznie układ odniesienia (OTW w rozumieniu Einsteina). My wyodrębniamy w pracy dwa zasadnicze schematy myślenia i interpretacji teorii fizycznych: schemat *newtonowski* – dostrzegany w kategoriach zjawisk zachodzących na tle sztywnej statycznej sceny (może nią być także czasoprzestrzeń Minkowskiego, która jest statyczna, czy też czasoprzestrzeń stacjonarna, tzn. metryka czasoprzestrzeni jest niezmiennicza względem translacji w czasie), oraz schemat *leibnizjański* – relatywistyczny w kategoriach czasoprzestrzeni relacyjnej. Zobaczmy, w jak różny sposób oba schematy odpowiadają na stawiane im pytania natury metafizycznej.

Kwestię ontycznej relacji między światem fizycznym a czasem i przestrzenią substancjalizm przedstawia w następujący sposób: czas i przestrzeń (ew. czasoprzestrzeń) istnieją jako niezależne substancje, pierwotne ontycznie względem świata fizycznego. Wielkości fizyczne (pola fizyczne, masy, ładunki) będą mogły być wyrażone w kategoriach własności czasoprzestrzeni. Punkty czasoprzestrzeni to indywidua. Relacjonizm twierdzi natomiast, że czas i przestrzeń (ew. czasoprzestrzeń) nie istnieją jako niezależne substancje. Świat fizyczny jest bytowo bardziej fundamentalny. Własności czasoprzestrzenne (np. zakrzywienie) są zdeterminowane przez własności fizyczne. Punkty czasoprzestrzeni to zdarzenia. Ontologia czasoprzestrzeni jest zatem zupełnie inaczej tłumaczona w obu nurtach. W substancjalizmie czas i przestrzeń to osobne substancje: cząstki zajmują miejsce w absolutnej przestrzeni; odległości między punktami przestrzeni są odległościami między cząstkami; własności geometrii przestrzeni są niejako dziedziczone przez cząstki/przedmioty fizyczne. W relacjonizmie czas i przestrzeń to tylko narzędzia conceptualne, wprowadzone, by dokonać opisu i uporządkowania relacji przestrzennych i czasowych pomiędzy przedmiotami fizycznymi. Prawdziwa i realna jest tylko relacja między cząstkami bez pośrednictwa przestrzeni, która jest tylko matematyczną reprezentacją tej relacji.

Jeśli traktujemy czasoprzestrzeń jako jakiś rodzaj bytu, to innymi słowy znaczy, że istnieje ona nawet wtedy, gdy nie znajdują się w niej żadne przedmioty. Wtedy ruch definiuje się jako zmianę położenia od punktu  $P$  do punktu  $P'$  czasoprzestrzeni. Czasoprzestrzeń lub czasoprzestrzenność jest relacją, jeśli stwierdzimy, że nie istnieje jako taka bez przedmiotów, pól fizycznych, cząstek, oddziaływań. One się na nią składają. Tu ruch określa się jako zmianę wzajemnego położenia obiektów.

Posługując się językiem współczesnej kosmologii, własności interpretacji czasoprzestrzeni, którą nazwiemy czasoprzestrzennym substancjalizmem, można streścić w następujący sposób. Wyróżniamy w ramach OTW czterowymiarową różniczkową różniczkową zdarzeń. Na tej powierzchni definiujemy pole metryczne/strukturę metryczną, która pozwala nam mierzyć, ile przestrzeni/czasu jest między zdarzeniami, określać interwały czasoprzestrzenne. W tej



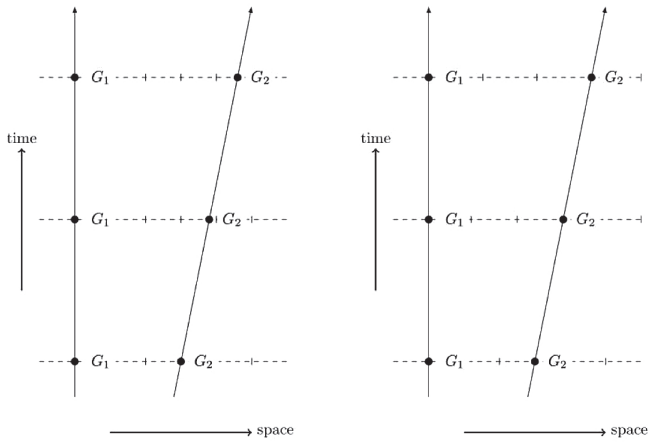
informacji metrycznej jest też włączona informacja o zaburzeniach czasoprzestrzeni spowodowanych grawitacją. Identyfikacja różniczkowej, która składa się ze zdarzeń, jako czasoprzestrzeni, która zawiera pole metryczne, nazywa się substancjalizmem. Powierzchnia poza tym posiada własność istnienia niezależnego od pól, które ją wypełniają.

Relacjonizm ogólnej teorii względności wyraża się w stwierdzeniu, że pojęcia przestrzeni i czasu tracą swój absolutny sens w OTW; sens absolutny posiada natomiast w pewnym sensie sama czasoprzestrzeń. Procesy fizyczne zachodzące na tle czasoprzestrzeni nie są od niej niezależne, ponieważ mogą i kształtują samą czasoprzestrzeń. Ich oddziaływanie na czasoprzestrzeń manifestuje się poprzez jej zakrzywienie. Zakrzywiony nie staje się czas i przestrzeń osobno, ale czasoprzestrzeń – fundamentalny obiekt teorii relatywistycznej, do którego odnoszą się prawa fizyki.

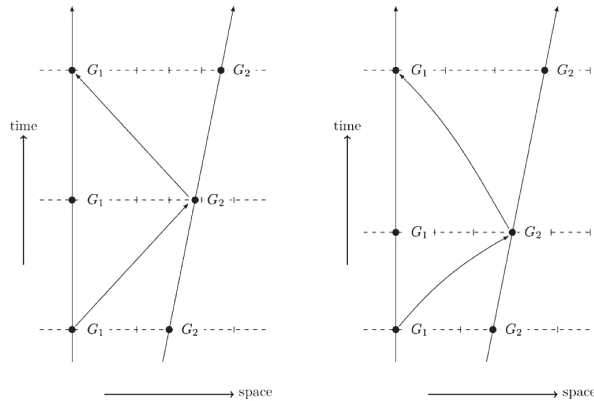
Trzeba w tym kontekście stwierdzić, że czasoprzestrzeń szczególnej teorii względności posiada jeszcze cechy absolutnej przestrzeni Newtona. Przejście między STW i OTW można interpretować zatem także w kategorii utraty absolutnego charakteru czasoprzestrzeni. Dotychczasowe podejście polegało na tym, że czasoprzestrzeń zawierała (w sensie pojemnika) pole grawitacyjne (zawarte w czasoprzestrzeni). W OTW pole grawitacyjne stało się częścią czasoprzestrzeni. Według poglądu standardowego pole grawitacyjne Słońca zmienia trajektorię Ziemi z naturalnego prostoliniowego ruchu w absolutnej czasoprzestrzeni. Z punktu widzenia OTW geometria czasoprzestrzeni jest zakrzywiona w ten sposób, że naturalną prostą linią (geodezyjną) jest w niej orbita ziemi wokół Słońca. Czasoprzestrzeń traci własność absolutności w tym sensie, że podlega zmianom pod wpływem swojej materialnej zawartości.

Jak widać zatem, ogólna teoria względności jest przykładem powrotu do fizyki pojmowanej relacjonistycznie.

Ciekawym natomiast przykładem współczesnej teorii grawitacji, która nawiązuje do idei substancjalizmu, jest idea niegeometrycznego podejścia do grawitacji R.P. Feynmana. Feynman pokazał, że równania Einsteina można wyprowadzić z teorii pola o spinie 2. Grawitacja zyskała tym samym równoważną, niegeometryczną interpretację. Oddziaływanie grawitacyjne jest wynikiem wymiany bezmasowych grawitonów. Opis geometryczny i niegeometryczny grawitacji na poziomie rozważań klasycznych prowadzą do takich samych wyników. Przestrzeń grawitacji Feynmana to pole grawitacyjne (niskoenergetyczne), pole cząstek o spinie 2 nazywanych grawitonami ( $h_{\mu\nu}$ ), określone w przestrzeni Minkowskiego z metryką ( $\eta_{\mu\nu}$ ). Związek formalny z polem w OTW ( $g_{\mu\nu}$ ) można ująć w następujący sposób:  $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + 2\lambda h_{\mu\nu}$ . Zakrzywienie czasoprzestrzeni uważa się tu za pozorny efekt działania pola grawitacyjnego. Mimo formalnego związku jest to, jak widać, zupełnie przeciwieństwo OTW, gdzie mamy jedno pole ( $g_{\mu\nu}$ ) opisujące krzywiznę przestrzeni.



Rys. 1. Kosmologiczny *redshift* może być rozumiany tylko na gruncie relacyjnym (Abramowicz, Lasota). Po lewej: ruch galaktyk w nieekspandującej płaskiej przestrzeni (podziałka nie zmienia się, a galaktyki przemieszczają). Po prawej: brak ruchu galaktyk, ale sama przestrzeń ekspanduje (podziałka się zwiększa).



Rys. 2. Względny ruch galaktyk widziany w czasoprzestrzeni. Po lewej: galaktyki poruszają się w przestrzeni, która jest statyczna. Po prawej galaktyki zajmują ustaloną pozycję w ekspandującej przestrzeni. Czasoprzestrzenna krzywizna sprawia, że trajektorie światła są różne w obu przypadkach i odróżnialny staje się ruch samych galaktyk w przestrzeni statycznej od ekspansji przestrzeni.

Wprowadziliśmy więc globalną przestrzeń Minkowskiego, w której określone są wszystkie pola łącznie z polem grawitacyjnym. Zakrzywienie czasoprzestrzeni będziemy uważać za pozorny efekt działania pola grawitacyjnego.



Aby to zilustrować w przystępny intuicyjnie sposób, posłużmy się analogią z niejednorodnie nagrzaną płytą, na której żyją istoty wykonujące pomiary metalowymi prętami mierniczymi. Pręty w zależności od miejsca pomiaru ulegać będą skróceniom i wydłużeniom termicznym. Istoty uznają więc najpierw, że przestrzeń jest zakrzywiona. Jednak wraz z opanowaniem techniki pomiarów laserowych ich przekonanie o krzywiźnie przestrzeni legnie w gruzach. W naszym przypadku płaską płytą jest przestrzeń Minkowskiego, a pole grawitacyjne rozkładem temperatury. Ponieważ każda forma energii oddziałuje grawitacyjnie, nasze pomiary zawsze będą zaburzone wpływem pola grawitacyjnego. Wprowadzanie zakrzywionych układów współrzędnych jest więc w tym obrazie tylko uogólnieniem. Trzeba jeszcze raz podkreślić, że w tej teorii elementem absolutnym jest czasoprzestrzeń Minkowskiego. Teoria jest budowana na sposób elektrodynamiki, a zasada kowariancji Einsteina nie jest postulatem, ale własnością emergentną. Grawitacja opisana równaniami Einsteina uzyskała równoważną, niegeometryczną – substancjalną interpretację.

Fizycy w bardzo różny sposób rozumieją relacyjność. Fizycy percypują ideę relacyjności poprzez zasadę niezależności od tła (*background independence*) oraz Macha ideę rozwiązania problemu bezwładności. Czasami, jak w przypadku Barboura, za realizację idei Leibniza uważa się eliminację pojęcia czasu<sup>10</sup>. Generalnie idea relacyjności jest inspirowana chęcią realizacji zasady Macha, zasady akcji-reakcji, czyli jest to rozumienie techniczne o intuicjach wziętych od Leibniza, że czasoprzestrzeń nie istnieje w oderwaniu od materii i zjawiska fizyczne (grawitacja) przejawiają swoje istnienie we wzajemnych relacjach pomiędzy obiektami. Zatem czasoprzestrzeń nie posiada samodzielnej egzystencji; można ją raczej traktować jako strukturalną własność pola.

Fizycy rozumieją zatem ideę relacjonistycznej fizyki, którą nazwaliby fizyką Leibniza, w swoisty sposób, zwykle w kontraście do teorii absolutystycznych. Nie istnieje przestrzeń i czas jako sztywne tło dla dziejących się zdarzeń. Własnościami na poziomie najbardziej fundamentalnym są relacje między nimi. Czas można definiować jako miarę zmian tych relacji oraz ich uporządkowania. Można to nazwać pierwszym warunkiem dla teorii relacjonistycznych: niezależność od tła. Drugi związany jest z wymogiem niezmienniczości odwzorowania dyfeomorfizmu. Oznacza on, że nie ma dodatkowych struktur fizycznych, które pozwalają nam wyróżnić pewien szczególny układ odniesienia. Istnieje pełna swoboda jego wyboru. Punkt w czasoprzestrzeni jest niejako determinowany nie przez współrzędne, ale poprzez zdarzenie fizyczne. Ma to szczególne znaczenie w tzw. argumentie dziury, który zostanie teraz omówiony.

---

<sup>10</sup> Por. Hohol 2012.

## Argument dziury na rzecz relacyjnej interpretacji OTW

W ostatniej części wywodu, który będzie miał teraz bardziej techniczny charakter, przestawimy tzw. argument dziury, który na jakiś czas opóźnił sformułowanie OTW i dla samego Einsteina stanowił podstawową przesłankę na rzecz interpretacji jego teorii w duchu relacyjnym<sup>11</sup>. Formalnie dokonujemy zapisu OTW w języku matematyki, stosując pojęcie powierzchni  $M$  (*manifold*) i traktując pola fizyczne jako znajdujące się na tej powierzchni. Natomiast podstawowa własność matematyczna opisu, dyfeomorfizm, sprawia, że stan wszechświata nie odnosi się do jednej wyróżnionej czasoprzestrzeni. Nie ma wyróżnionego położenia. Powierzchnia, którą nazywamy czasoprzestrzenią, jest narzędziem matematycznym bez odniesienia do czegokolwiek fizycznego. Pole fizyczne to nie są własności punktów przestrzennych w takim sensie, jak malowidło znajduje się na ścianie.

Definiujemy własności metryczne pola grawitacyjnego poprzez tzw. tensor metryczny ( $g$ ), a odległość jako całkę po tym polu. Przypomnijmy sobie Kanta i jego upatrywanie w geometrii euklidesowej koniecznego bytu. Takiej własności nie ma geometria Riemanna. Dokonajmy formalnego przestawienia argumentu. Niech  $\langle M, g, T \rangle$  to trójka będąca rozwiązaniem równań pola OTW. Rozwiązanie jest określone *modulo* dyfeomorfizm zachowujący metrykę (izometria). To znaczy  $\langle M, g, T \rangle$  jest rozwiązaniem wtedy i tylko wtedy, gdy  $\langle M, g', T' \rangle$  jest rozwiązaniem tych samych równań.

Fizycznie symetria niezmienniczości względem dyfeomorfizmu oznacza wiodącą zasadę niezależności od tła (*background independence*) Riemanna. Niech  $M$  zawiera obszar, w którym  $T=0$ , nazywamy go **dziurą**  $H$ . Zadajmy pytanie, czy metryka  $g$  jest jednoznacznie wyznaczona przez  $T$  (rozkład materii we Wszechświecie) – kosmologicznym rozwiązaniu równań pola OTW? Odpowiedź brzmi: nie. Skoro dyfeomorfizm ustala równoważność czasoprzestrzeni, to wybierzmy go w pewien szczególny sposób: a) jest identycznością na zewnątrz dziury i dowolny w jej wnętrzu. Na brzegu zawsze gładko możemy „zszyć” składane dyfeomorfizmy.  $T$  znika w  $H$ , zatem po transformacji dyfeomorfizmu (tensor zerowy) zniknie też  $T'$ . Czyli  $T$  i  $T'$  są identyczne, więc powinny determinować równoważną metrykę  $g=g'$  w  $M$ , ale  $g'$  wewnątrz dziury jest dowolne, bo tak mogliśmy wybrać (*sic!*).

Wniosek z tych ustaleń można przedstawić w postaci alternatywy: albo  $T$  nie wyznacza jednoznacznie geometrii czasoprzestrzeni, albo zasada akcja-reakcja nie jest realizowana w OTW. Nie da się pogodzić zasady kowariancji (opisu wielkości fizycznych w terminach tensorów, obiektów z natury niezależnych od wyboru układu współrzędnych), równań pola i zasady akcja-reakcja

<sup>11</sup> Earman, Norton 1987.

(III zasada dynamiki Newtona). Zasada akcja-reakcja, której prototypem jest zasada Macha, nie jest realizowana w OTW, co jest świadectwem za tym, że OTW jest jedynie teorią efektywną, emergentną w stosunku do bardziej fundamentalnej teorii grawitacji.

Dokonajmy interpretacji argumentu dziury w kontekście dyskutowanego w pracy sporu między absolutystycznym a relacyjnym rozumieniem czasoprzestrzeni. Przypomnijmy substancjalny punkt wyjścia: czasoprzestrzeń jest „gołą” różniczkową  $M$ . Dopiero na niej są określone pola fizyczne  $g$  i  $T$ . Czy w takim razie to „gołe”  $M$  jest pojemnikiem? Przecież zdaniem Einsteina  $g$  konstytuuje  $M$ , chyba że pojemnik jest obiektem ze świata matematyki. Einstein rozumuje tak: jeśli obszar dziury  $H$  jest bez pola grawitacyjnego (nie jest nawet czasoprzestrzeń Minkowskiego), to nie pozostaje nic, bo pole determinuje to  $g$ , które określa  $M$ . Przestrzeń oceniana z punktu widzenia OTW nie jest przestrzenią bez pola, ale specjalnym przypadkiem pola  $g$ . Prowadzi to do wniosku, że nie istnieje coś takiego jak pusta przestrzeń, tj. przestrzeń bez pola. Czasoprzestrzeń posiada egzystencję jako strukturalna własność pola<sup>12</sup>. Einstein podważa tym samym podstawową intuicję substancjalisty, który poszukuje czasoprzestrzeni jako pojemnika dla pól fizycznych (jak Feynman).

Stwierdziliśmy, że nie da się pogodzić zasady kowariancji, równań pola i zasady akcja-reakcja. Rotman i Ellis zaproponowali pewną odmienną interpretację równań Einsteina, twierdząc, że jego intuicje fizyczne brały się z realizacji III zasady Newtona jego praw dynamiki<sup>13</sup>. Dla nas taka interpretacja równań pola OTW tłumaczy stosunek Einsteina do tzw. stałej kosmologicznej. Einstein wycofał się z umieszczania tego członu kosmologicznego, na którym oparł swój model statycznego Wszechświata.

Jeśli spojrzeć na równania pola OTW, to stała kosmologiczna  $\Lambda$  jest mnożona przez metrykę. Oprócz stałej kosmologicznej przez metrykę jest mnożony także skalar Ricciego  $R$ , mamy bowiem w tensorze Einsteina człon  $g_{\mu\nu}R$ .

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = T_{\mu\nu}$$

Procesy fizyczne modelują krzywiznę i na odwrót, krzywizna wpływa na przebieg samych procesów fizycznych. Jeśli więc spojrzeć na człon  $g_{\mu\nu}R$ , to rzeczywiście, jeśli  $R$  się zmienia, to i prawa strona równań Einsteina  $T_{\mu\nu}$  też się zmienia. Z drugiej strony, jeśli  $T_{\mu\nu}$  się zmienia, to i skalar Ricciego  $R$ . W przypadku, gdy stałą kosmologiczną umieścimy po lewej stronie równań pola, tak nie jest! Oznacza to, że cokolwiek by się działo we wszechświecie

<sup>12</sup> Por. Gołosz 1995: 66–67.

<sup>13</sup> Por. Rotman, Ellis 1987.

i jak nie zmieniałoby się  $T_{\mu\nu}$ , to  $\mathcal{A}$  pozostaje stała! Tak więc  $T_{\mu\nu}$  nie wpływa na  $\mathcal{A}$ , ale  $\mathcal{A}$ , poprzez równania Einsteina, wpływa na  $T_{\mu\nu}$ . Reasumując, stała kosmologiczna łamie zasadę akcja-reakcja – kwintesencję determinizmu OTW.

## Zakończenie

Dlaczego tak trudno, także w kosmologii, przynajmniej na poziomie popularnym, myśleć o czasoprzestrzeni w kategoriach relacyjnych? Być może trudność tę wywołuje istnienie od czasów Newtona pewnych poznawczych uwarunkowań związanych z substancjalnym myśleniem, przenoszonym także na pole kosmologii. Myślenie w kategoriach odrębnego czasu i przestrzeni jest głęboko uwarunkowane przez nasze doświadczenie zewnętrzne, które w różny sposób każe nam postrzegać czas i przestrzeń. Nasza percepcja zmysłowa przebiega w taki sposób, że mamy skłonność do przedstawiania sobie ewolucji Wszechświata jako rozgrywającej się w czasie zewnętrznym. Nie potrafimy zobaczyć procesów fizycznych zachodzących w czasoprzestrzeni w analogiczny sposób, jak nie potrafimy zobaczyć obiektu bez jego zanurzenia w zewnętrznej przestrzeni tła. Czasoprzestrzeń, która jest obiektem niezanurzonym w 3-wymiarowej przestrzeni euklidesowej, nie daje się nam wyobrazić, chociaż doskonale rozumiemy, jak jest skonstruowana. Koncepcja czasoprzestrzeni, unifikującej pojęcia czasu i przestrzeni, jest pojęciem skonstruowanym tak, aby prawa fizyki do niej się odnosiły, ale przestaje już być obiektem naocznym.

Idee fizyki relacyjnej są bardzo aktualne we współczesnej fizyce, w której obecnie mamy wiele sytuacji kryzysowych. Wymieńmy chociażby trudności z połączeniem mechaniki kwantowej oraz grawitacji<sup>14</sup>. Fizycy upatrują źródło tej sytuacji kryzysowej w odmiennym języku pojęciowym. Gdyby mechanikę kwantową sformułować w sposób relacyjny, to wówczas może łatwiej byłoby dostrzec, jak można by połączyć te teorie.

W nomenklaturze anglosaskiej, która ma swe źródła w pismach Einsteina, funkcjonuje całkiem użyteczny podział na przestrzeń typu *undressed* i *dressed*. Pierwsza przestrzeń traktowana jest jako pustka, istniejąca jednak niezależnie od obiektów, które się w niej znajdują. Ciekawe, że przed Newtonem była to koncepcja nieintuicyjna, trudna do przyjęcia. W przestrzeń typu *dressed* wierzył Arystoteles: był jako coś materialnego, fizycznego, na przykład wypełnionego eterem. Przestrzeń jako nieskończenie rozciągająca się pustka, próżnia, nie istnieje według Stagiryty; świat jest skończony.

Do końca XIX wieku dominował pogląd Kartezjański: przestrzeń to byt, którego konstrukcją jest to, co fizyczne. Dopiero powstanie OTW przywróciła

<sup>14</sup> Por. Woszczyk 2014.

do świata nauki koncepcję *dressed*, czasoprzestrzeni jako pewnej struktury, na którą składa się nie tylko dynamiczna krzywizna geometrii, ale także wirtualne stany próżni.

Badania dotyczące natury przestrzeni (podobnie jak czasoprzestrzeni) Einstein lokuje w ramach postulowanej przez siebie tzw. „geometrii praktycznej”<sup>15</sup>. Wiemy, że w XIX wieku matematyka badała, już jakiś czas przed Einsteinem, własności wielowymiarowych przestrzeni. Natomiast Einstein oryginalnie odróżnia – „geometrię praktyczną” (niejako fizyczną) od czysto matematycznej, zaksjomatyzowanej teorii. Taka geometria praktyczna należy, według niego, do nauk przyrodniczych i jest jedną z najstarszych gałęzi fizyki. Idąc tym tropem, trzeba stwierdzić, że na przykład euklidesowość lub nieeuklidesowość geometrii Wszechświata jest problemem fizycznym, nie apriorycznym. Można powiedzieć w języku nauk empirycznych, że jest to obserwabla.

Do chwili powstania OTW istniał, w oparciu o aktualny wtedy stan wiedzy astronomicznej, pewien obraz statycznego Wszechświata. Narodziny kosmologii relatywistycznej spotykały się z różnymi reakcjami uczonych wobec statycznej i dynamicznej koncepcji Wszechświata (Milne i Einstein)<sup>16</sup>. Czołowymi reprezentantami newtonowskiego podejścia do czasu i przestrzeni są Milne, McCrea, ale także Tolman czy również prawie całe środowisko astronomów. Paradoksalnie, Einsteina – twórcę ogólnej teorii względności – można nazwać, w pewnym okresie jego aktywności naukowej, „newtonistą”, z powodu jego konsekwentnego upierania się przy modelu statycznym i później jego interpretacji *redshiftów* w widmach galaktyk jako efektu „starzenia fotonów”. W istocie, założenie statyczności albo stacjonarności wszechświata implikuje model statycznej czasoprzestrzeni Minkowskiego albo model stacjonarny de Sittera. Dynamiczna, ewoluująca w czasie czasoprzestrzeń, mająca charakter relacyjny, implikuje model wszechświata Friedmanna-Robertsona-Walkera, skonstruowany w oparciu o einsteinowską zasadę kosmologiczną.

Richard Feynman miał odmienne podejście do opisu zjawiska grawitacji od Einsteina. Jego podejście, z uwagi na poczynione założenia, można nazwać Feynmanowską koncepcją absolutnej czasoprzestrzeni i niegeometrycznej grawitacji. Skonstruowana przez niego teoria grawitacji z faktu postulowania przestrzeni tła dla zachodzących zjawisk przestrzeni Minkowskiego (przestrzeń szczególnej teorii względności) jest od samego początku nierelacjonistyczna. Jest również teorią niegeometryczną, budowaną przez analogię do elektrodynamiki kwantowej. Grawitacja jest teorią pola o spinie 2.

Nawiązując do motta naszej pracy, trzeba powtórzyć, że w fizyce współczesnej obserwujemy odwrót od podejścia „*Shut up and calculate!*” w kierunku

<sup>15</sup> Einstein 1921.

<sup>16</sup> Por. Szydłowski, Tambor 2010.

filozofii (Smolin, Rovelli i inni). Ten zwrot jest inicjowany przez fizyków. Motywacja w kierunku zbudowania fizyki relacyjnej w duchu Leibniza bierze się z nagromadzenia problemów, takich jak unifikacja grawitacji z mechaniką kwantową, w kosmologii problem ciemnej materii i ciemnej energii, problem stałej kosmologicznej. Istnieje pogląd, że fizyka relacyjna pozwoli rozwiązać problemy na styku teorii. Twierdzimy, że matematyka (analiza matematyczna) poszła drogą Newtona, fizyka natomiast kroczy drogą relacjonizmu Leibniza.

Pokazaliśmy w pracy, że zasadniczo istnieją dwie teorie grawitacji: teoria grawitacji Feynmana – oparta na substancjalnej koncepcji czasoprzestrzeni Minkowskiego, oraz ogólna teoria względności Einsteina – z elementami teorii relacyjnej. Ta pierwsza wyprowadza kowariancję równań, ta druga ją postuluje. Przedstawiliśmy na nowym gruncie stary spór między Leibnizem i Clarkiem, wyróżniając dwa schematy pojęciowe: substancjalny oraz absolutystyczny – gdzie przestrzeń jest tylko „pojemnikiem-sceną”, na której rozgrywają się zjawiska fizyczne zachodzące we Wszechświecie, oraz relacyjny – czasoprzestrzeń posiada swoją strukturę wewnętrzną i jest tworem dynamicznym. Ekspansja czasoprzestrzeni jako takiej jest zjawiskiem fizycznym.

Taka siatka pojęciowa wydaje się być dualna do klasycznego w filozofii fizyki czasu i przestrzeni podziału, znanego jako podział na substancjalizm vs. relatywizm (albo relacjonizm). Podział dotyczy w konsekwencji opowiedzenia się za substancjalną lub relacyjną koncepcją ruchu – tego, czy zdarzenia traktujemy indywidualnie, czy też współrzędne traktujemy jako nasz wygodny opis. Analiza i interpretacja argumentu dziury pokazała, w jaki sposób praca badawcza Alberta Einsteina jest przykładem, jak trudna jest zmiana przekonań co do najgłębszej natury podstawowych kategorii, które wiąże teoria fizyczna (w tym przypadku OTW): czasu, przestrzeni, czasoprzestrzeni.

Przykładem konkretnych i skutecznych prób budowania fizyki nawiązującej do idei Leibniza jest także Kułakowa propozycja programu fizyki relacyjnej, warta z pewnością specjalnego opracowania na gruncie filozofii nauki. W latach 60. XX wieku Kułakow i jego uczniowie rozwinęli tzw. teorię struktur fizycznych opisywanych przez prawa fizyki<sup>17</sup>. Autorzy podali metodę znajdowania uniwersalnych relacji typu algebraicznego pomiędzy elementami (obiektami) zbiorów i relacji między nimi. Ich program nawiązuje do programu Leibniza i Macha. W ich pracach pokazano, że np. euklidesowe, trójwymiarowe, przestrzenne relacje można traktować jako szczególny przypadek struktur fizycznych na jednym zbiorze elementów. W ten sposób geometria euklidesowa może być przedstawiona jako układ relacji. Podobnie można zrobić dla przypadku czasoprzestrzennej geometrii, mechaniki Newtona i innych teorii fizycznych.

---

<sup>17</sup> Por. Kulakov 1970a; Kulakov 1970b.



## Bibliografia

- Abramowicz M.A. (2008), *Spacetime is not just space and time*, „New Astronomy Reviews” 51, s. 799–802.
- Barbour J.B. (1992), *Relational Concepts of Space and Time*, „British Journal for the Philosophy of Science” 33, s. 251–274.
- Barbour J.B., Bertotti B. (1982), *Mach's Principle and the Structure of Dynamical Theories*, „Proceedings of the Royal Society” (London) 382, s. 295–306.
- Broad C.D. (1981), *Leibniz's Last Controversy with the Newtonians*, w: R.S. Woolhouse (ed.), *Leibniz: Metaphysics and the Philosophy of Science*, Oxford University Press.
- Callender C. (2002), *Philosophy of Space-Time Physics*, w: *The Blackwell Guide to the Philosophy of Science*, ed. P. Machamer, Cambridge: Blackwell, s. 173–198.
- Earman J., Norton J. (1987), *What Price Spacetime Substantivalism: The Hole Story*, „The British Journal for the Philosophy of Science” 38, s. 515–525.
- Einstein A. (1921), *Geometry and Experience* [oryg. *Geometrie und Erfahrung*], Berlin: Springer.
- Feynman R.P. (1963), *Quantum Theory of Gravitation*, „Acta Physica Polonica” 24, s. 657–722.
- Feynman R.P. (2006), *Wykłady z grawitacji*, Prószyński i S-ka.
- Gale G. (2011), *Cosmology: Methodological debates in the 1930s and 1940s*, w: E.N. Zalta (ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Summer 2011 Edition.
- Gólosz J. (1995), *Czas i przestrzeń a świat fizyczny*, „Zagadnienia Filozoficzne w Nauce” XVII, s. 49–61.
- Hohol M.L. (2012), *Dlaczego Julian Barbour ogłosił koniec czasu?*, w: *Wymiary czasu*, red. Z. Sajdek, M. Małecki, D. Bentke, Biblos, Tarnów, s. 108–122.
- Kulakov Yu.I. (1970a), *The one principle underlying classical physics*, „Doklady Akademii Nauk SSSR” 193, nr 1, s. 72–75.
- Kulakov Yu.I. (1970b), *The geometry of spaces of constant curvature as a special case of the theory of physical structures*, „Doklady Akademii Nauk SSSR” 193, nr 5, s. 985–987.
- Leibniz G.W., Clarke S. (1956), *Correspondence 1715–1716*, w: *The Leibniz-Clarke Correspondence. Together with Extracts from Newton's „Principia” and „Optiks”*, ed. H.G. Alexander, Manchester: Manchester University Press.
- Norton J. (2003), *What Can We Learn about the Ontology of Space and Time from the Theory of Relativity?* [preprint].
- Nussbaumer H. (2014), *Einstein's conversion from his static to an expanding universe*, „The European Physical Journal H” 39, s. 37–62.



- Raifeartaigh C.O., McCann B. (2014), *Einstein's cosmic model of 1931 revisited: an analysis and translation of a forgotten model of the universe*, „The European Physical Journal H” 39, s. 63–85.
- Raifeartaigh C.O., McCann B., Nahm W., Mitton S. (2014), *A steady-state model of the universe by Albert Einstein*, arXiv:1402.0132.
- Rotman T., Ellis G.F.R. (1987), *Metainflacja*, „Postępy Fizyki” 38, s. 511–534.
- Rovelli C. (1996), *Relational quantum mechanics*, „International Journal of Theoretical Physics” 35, s. 1637–1678.
- Rovelli C. (2006), *The Disappearance of Space and Time*, w: D. Dieks (ed.), *Philosophy and Foundations of Physics*, Vol. I: *The Ontology of Spacetime*, Elsevier.
- Smolin L. (2005), *The case of background independence*, arXiv:hep-th/0507235.
- Szydłowski M., Tambor P. (2008), *Albert Einstein i stała kosmologiczna*, „Kwartalnik Historii Nauki i Techniki” 53, nr 3–4, s. 343–361.
- Szydłowski M., Tambor P. (2010), *Kosmologia współczesna w schemacie pojęciowym kolektywu badawczego i stylu myślowego Ludwika Flecka*, „Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska”, Sectio I: Philosophia-Sociologia, XXXV (2), s. 101–132.
- Vassallo A., Esfeld M. (2016), *Leibnizian relationalism of general relativistic physics*, arXiv:1608.07257, physics.hist-ph.
- Woszczek M. (2014), *Relacyjna mechanika kwantowa, uniwersalna zasada względności i podstawy fizyki*, „Studia Metodologiczne” nr 33, s. 63–96.

## Streszczenie

W artykule przedstawiamy różne aspekty sporu pomiędzy substancjalną a relacyjną koncepcją czasu i przestrzeni. W tym kontekście dyskutujemy relacyjną strukturę ogólnej teorii względności Einsteina (OTW) oraz kontrastującą z nią Feynmanowską koncepcję absolutnej czasoprzestrzeni i niegeometrycznej teorii grawitacji. Teoria Feynmana jest alternatywna do OTW i nawiązuje do koncepcji absolutystycznej. Konfrontację między tymi teoriami można uważać za współczesną debatę analogiczną do dyskusji między Leibnizem i Clarkiem. W pracy odnosimy się również do kosmologii i pokazujemy na przykładzie wyjaśniania ekspansji Wszechświata różnice między substancjalnym a relacyjnym stylem myślenia. Pokazujemy, że efekt ekspansji może być interpretowany tylko na gruncie kosmologii relacjonistycznej. Wskazujemy również na oryginalność myślenia Einsteina, dla którego relacyjna struktura teorii była przewodnikiem do jej poprawnego sformułowania.