Przegląd Filozoficzny – Nowa Seria
R. 26: 2017, Nr 1 (101), ISSN 1230–1493

Jan Czerniawski

Czasoprzestrzeń Leibniza w fizyce nierelatywistycznej i w teorii względności

Słowa kluczowe: *geometria tła, czasoprzestrzeń Leibniza, czasoprzestrzeń Galileusza, eter, teoria względności, protofizyka*

Wstęp

Na pierwszy rzut oka hasło sformułowane w tytule brzmi jak podwójny anachronizm. Po pierwsze, pojęcie czasoprzestrzeni nie było znane G.W. Leibnizowi – do obiegu wprowadził je dopiero H. Minkowski, zresztą jeszcze bez odpowiedniego terminu. Po drugie, uważa się, że szczególna teoria względności, w której kontekście się pojawiło, zdezaktualizowała wcześniejsze wyobrażenia na temat czasu i przestrzeni, od których Leibniz tylko nieznacznie odszedł.

Z drugiej strony jednak, sensownym zagadnieniem jest poszukiwanie geometrii, jaką należałoby przypisać czasoprzestrzeni najbardziej odpowiadającej poglądom Leibniza na czas i przestrzeń. Co więcej, przekładanie historycznych kontrowersji dotyczących natury czasu i przestrzeni na język geometrii czasoprzestrzeni jest dziś standardowym podejściem. Okazuje się, że nie tylko udaje się w tym języku wyrazić zaskakująco dużo z historycznych stanowisk, ale w przeciwieństwie do poglądu I. Newtona, pogląd Leibniza trudno wręcz wyrazić bez niego.

Mogłaby się za to wydawać niedorzeczna próba zastosowania poglądu Leibniza, nawet przełożonego na język geometrii czasoprzestrzeni, do interpretacji teorii względności. Uważa się przecież, że już szczególna teoria względności radykalnie zrywa z wcześniejszymi wyobrażeniami na temat czasu i przestrzeni, a teoria ogólna jeszcze to zerwanie pogłębia. W świetle nowych wyobrażeń, czas i przestrzeń mają być zaledwie „cieniami" bądź niesamodzielnymi aspektami pewnej ich nierozdzielnej „unii" (Minkowski 1909: 104). Tymczasem Leibniz podkreśla odmienność natur czasu i przestrzeni choćby w swoich określeniach czasu jako „porządku następstwa", zaś przestrzeni jako „porządku współistnienia" (Leibniz 1969: 336).

Faktycznie, jeśli ograniczyć się do maksymalnej struktury definiowalnej w ramach teorii względności, to trudno w niej odnaleźć elementy pozwalające skonstruować strukturę odpowiadającą poglądom Leibniza. Z tego jednak, że czasoprzestrzeni można przypisać strukturę postulowaną przez teorię fizykalną, nie wynika, by nie można było przypisać jej struktury bogatszej na podstawie racji wykraczających poza fizykę rozumianą w świetle przyjętych dziś kryteriów. Taka wzbogacona struktura zaś mogłaby już zawierać potrzebne elementy. Przekonamy się, że tak właśnie jest, zaś najpoważniejszych racji na rzecz takiej odpowiedzi dostarcza protofizyka.

Czasoprzestrzeń Leibniza a czasoprzestrzeń mechaniki nierelatywistycznej

U podstaw koncepcji czasu i przestrzeni Newtona, twórcy mechaniki nierelatywistycznej, leżą pojęcia absolutnej przestrzeni i absolutnego czasu (zob. Newton 2015: 87). Każde zjawisko mechaniczne zachodzi w jednoznacznie określonym miejscu w absolutnej przestrzeni i w jednoznacznie określonym przedziale absolutnego czasu. Ponieważ zaś w czasach Newtona nie dysponowano pojęciem przestrzeni nieeuklidesowej, należy domniemywać, że absolutna przestrzeń miała być (trójwymiarową) przestrzenią euklidesową.

Absolutne miejsca, z założenia stanowiące części absolutnej przestrzeni, można zrekonstruować teoriomnogościowo jako zbiory absolutnych punktów, stanowiące podzbiory zbioru punktów zrekonstruowanej w ten sposób przestrzeni. Podobnie, przedziały czasu można zrekonstruować jako podzbiory czasu jako jednowymiarowego zbioru momentów, czyli czasowo punktowych chwil. Zarówno absolutna przestrzeń, jak i absolutny czas, miały być określone „niezależnie od czegokolwiek zewnętrznego", zatem, jak można domniemywać, również od siebie nawzajem. Gdyby więc chcieć się pokusić o zrekonstruowanie odpowiadającej tym wyobrażeniom czasoprzestrzeni Newtona, nazywanej przez fizyków nieco mniej trafnie (por. Earman 1989: 33–34) czasoprzestrzenią Arystotelesa, to byłaby ona iloczynem kartezjańskim absolutnego czasu i absolutnej przestrzeni (por. Penrose 2006: 368 i 371) (lub odwrotnie, to kwestia umowy), stanowiącym zbiór absolutnych punktochwil.

Jako koncepcja odpowiadająca mechanice nierelatywistycznej, czasoprzestrzeń Newtona ma jednak poważną wadę, a mianowicie pewien nadmiar struktury. Jest w niej bowiem określona absolutna kolokacja (zob. Augustynek 1972: 13), tj. relacja bycia w tym samym absolutnym miejscu, co byłoby równoważne określeniu absolutnego spoczynku, a w konsekwencji również absolutnego ruchu. Tymczasem co najmniej od czasów M. Kopernika żywe było już wyobrażenie, według którego ruch jest z istoty względny, stanowiąc relację, w jaką dane ciało wchodzi z pewnym ciałem odniesienia, bądź określonym bardziej abstrakcyjnie układem odniesienia.

Od absolutnej przestrzeni Newton odróżniał przestrzenie względne, w domyśle: w różnych układach odniesienia, a od czasu absolutnego czasy względne. Na temat przestrzeni absolutnej i względnej, a tym samym na temat dowolnych dwóch przestrzeni względnych, zakładał jednak, że „są takie same pod względem postaci i wielkości, ale nie zawsze pozostają identyczne numerycznie" (Newton 2015: 87). Takożsamość co do postaci i wielkości oznacza, że w każdym momencie przestrzeń absolutna i względna, jak również przestrzenie względne w dowolnych dwóch układach odniesieniach, nakładają się na siebie, więc w zasadzie miejsca w obu można w tym momencie utożsamić. W innych momentach jednak to utożsamienie nie musi zostać zachowane, bo pozostawanie w tym samym miejscu, tj. kolokacja, nie musi oznaczać tego samego w jednej przestrzeni, co w drugiej. Łatwo zauważyć, że jest tak jedynie w przypadkach, gdy przestrzeń względna porównywana z absolutną określona jest w układzie absolutnie spoczywającym, bądź porównywane przestrzenie względne określone są w układach względem siebie spoczywających.

Inaczej rzecz się ma w przypadku czasu absolutnego i względnego. Zamiast przyjąć tu analogiczne do założenia dotyczącego przestrzeni założenie o identyczności czasu absolutnego i względnego co do skali (należy zakładać, że domyślnie przyjmował identyczność równoczesności), Newton dopuścił, by czas względny był miarą trwania „czy to dokładną, czy to nierówną" (Newton 2011: 190), tj. by identyczność skali nie zachodziła. Jest to ewidentna niekonsekwencja, której jedynym motywem wydaje się chęć zachowania odróżnienia czasu absolutnego od względnego. Gdyby bowiem Newton konsekwentnie założył identyczność skali, to zamiast wielu czasów względnych otrzymałby jeden, który naturalne byłoby utożsamić z czasem absolutnym.

Po naturalnej korekcie, w czasoprzestrzeni odpowiadającej poglądom Newtona, poza absolutnym czasem i absolutną przestrzenią określony jest wspólny czas względny dla wszystkich układów odniesienia, identyczny z czasem absolutnym co do skali i równoczesności, jak również mnogość przestrzeni względnych w różnych układach, identycznych co do geometrii z przestrzenią absolutną, natomiast na ogół różniących się od niej co do kolokacji. Zwolennik idei względności ruchu, jakim niewątpliwie był Leibniz, nie musi w tym obrazie kwestionować nic poza absolutną kolokacją jako częścią określenia absolutnej przestrzeni. Jej zakwestionowanie jednak oznacza odejście od wyobrażenia czasoprzestrzeni jako iloczynu kartezjańskiego czasu i przestrzeni w stronę jakiegoś uogólnienia tego pojęcia, w którym równoczesność ma charakter absolutny, ale kolokacja nie. Takim uogólnieniem zaś jest wiązka włóknista przestrzeni momentalnych z czasem absolutnym jako przestrzenią bazową (Penrose 2006: 370).

Za przypisaniem czasoprzestrzeni struktury stanowiącej taką wiązkę czasoprzestrzeni Leibniza (zob. Ehlers 1973: 74), poza argumentem już przedstawionym, dodatkowo przemawia fakt niedefiniowalności w ramach mechaniki nierelatywistycznej absolutnego spoczynku, a tym samym absolutnej kolokacji. W teorii tej obowiązuje bowiem zasada względności Galileusza (Kopczyński, Trautman 1981: 66–67), w świetle której prawa mechaniki wyrażają się jednakowo we wszystkich poruszających się względem siebie inercjalnych układach odniesienia, tj. układach, w których obowiązuje zasada bezwładności Galileusza, stanowiąca zarazem I zasadę dynamiki Newtona. Czasoprzestrzeń Newtona więc, jako czasoprzestrzeń mechaniki Newtona, ma pewien nadmiar struktury, wyrażający się właśnie w obecności w niej absolutnej kolokacji, mimo jej niedefiniowalności w ramach tej teorii – jej struktura jest zatem w tym sensie patologiczna. Z drugiej strony jednak w czasoprzestrzeni Leibniza brakuje elementu pozwalającego wyróżnić klasę układów inercjalnych, definiowalną już za pomocą samej zasady bezwładności, nie mówiąc nawet o całej mechanice nierelatywistycznej. Czasoprzestrzeń ta więc zdecydowanie nie nadaje się do roli czasoprzestrzeni odpowiadającej tej teorii z uwagi na ten ewidentny deficyt struktury.

O jaki element należałoby minimalnie uzupełnić czasoprzestrzeń Leibniza, aby otrzymać strukturę bez tego deficytu? Jako iloczyn kartezjański jednowymiarowego czasu i euklidesowej przestrzeni, które są przestrzeniami afinicznymi (płaskimi), czasoprzestrzeń Newtona jest przestrzenią afiniczną (Kopczyński, Trautman 1981: 45–46), w której wśród różnych linii można jednoznacznie wyróżnić klasę linii prostych, w tym w szczególności prostych nieprzestrzennych, tj. niezawartych w trójwymiarowych hiperpowierzchniach reprezentujących w czasoprzestrzeni przestrzenie momentalne. Każda taka prosta reprezentuje w czasoprzestrzeni ruch w absolutnym sensie jednostajny prostoliniowy punktu materialnego, a każdej jej punktochwili można jednoznacznie przypisać moment czasu absolutnego, wobec czego linie takie zasługują na określenie jako proste czasowe, bądź czasopodobne.

Z drugiej strony, w świetle zasady bezwładności, takimi właśnie ruchami poruszają się swobodne punkty materialne, z którymi związać można inercjalne układy odniesienia. Tym więc, czego brakowało czasoprzestrzeni Leibniza, była struktura przestrzeni afinicznej (Penrose 2006: 371). Minimalną strukturą czasoprzestrzeni odpowiadającej mechanice relatywistycznej jest zatem czasoprzestrzeń Galileusza, stanowiąca wiązkę włóknistą przestrzeni momentalnych dodatkowo wyposażoną w strukturę przestrzeni afinicznej.

Struktury czasoprzestrzeni fizyki nierelatywistycznej bez grawitacji

Aby efektywnie porównać struktury czasoprzestrzeni odpowiadające poglądom Newtona i Leibniza między sobą oraz ze strukturą wymaganą przez mechanikę nierelatywistyczną, trzeba ich opis nieco skonkretyzować. Spróbujmy najpierw opisać je w stylizacji zaproponowanej w cytowanym podręczniku (Kopczyński, Trautman 1981). W jej ramach punktochwile zostały utożsamione z (czasoprzestrzennie punktowymi) zdarzeniami elementarnymi, co nie jest bynajmniej zabiegiem neutralnym, gdyż odpowiada mu rozstrzygnięcie na rzecz atrybutywnej koncepcji czasoprzestrzeni, jako przeciwstawionej koncepcji substancjalnej. Prowizorycznie jednak przyjmiemy tu to utożsamienie, pamiętając tylko, że w zasadzie to rozstrzygnięcie należałoby jakoś uzasadnić.

Specyfika zaproponowanej stylizacji wyraża się w tym, że czasoprzestrzeń wyposaża się najpierw w strukturę przestrzeni afinicznej, określając przestrzeń wektorową V, zadającą na zbiorze zdarzeń (bądź punktochwil) E translacje. W czasoprzestrzeni afinicznej, którą przy tej konstrukcji można określić jako dwójkę (E, V), czas absolutny wprowadza się, określając na przestrzeni wektorowej V funkcję liniową τ o wartościach rzeczywistych (tzw. formę liniową), pozwalającą zdefiniować odstęp czasowy między zdarzeniami, które można połączyć danym wektorem, jako jej wartość dla tego wektora. Forma τ pozwala z kolei wyznaczyć w przestrzeni V podprzestrzeń wektorów przestrzennych S, dla których przyjmuje wartość zerową, co oznacza, że zdarzenia, które można nimi połączyć, są równoczesne, tworząc tym samym trójwymiarowe hiperpowierzchnie stanowiące przestrzenie momentalne. W końcu zaś, na podprzestrzeni S określa się funkcję (formę) biliniową h o wartościach rzeczywistych nieujemnych, stanowiącą iloczyn skalarny pozwalający określić w przestrzeniach momentalnych kwadrat odległości między zdarzeniami, jako równy iloczynowi skalarnemu łączącego je wektora przez siebie. To zaś pozwala określić czasoprzestrzeń Galileusza jako czwórkę (E, V, τ, h) (Kopczyński, Trautman 1981: 53).

Konstrukcja czasoprzestrzeni Newtona w tej stylizacji nie sprawia większych trudności. Wystarczy wyróżnić w niej klasę prostych czasowych reprezentujących absolutny spoczynek, czy bardziej neutralnie: wyróżniony układ odniesienia (eter geometryczny), co można zrobić, wyróżniając w przestrzeni V pewien wektor czasowo jednostkowy e (Kopczyński, Trautman 1981: 58 i 82), wyznaczający ich kierunek. Można ją więc określić jako piątkę (E, V, τ, h, e). Natomiast zasadniczy problem pojawia się, gdyby chcieć w podobny sposób określić czasoprzestrzeń Leibniza, która jest pozbawiona struktury przestrzeni afinicznej, reprezentowanej przez przestrzeń V. Nie wchodzi więc w grę określenie absolutnego czasu i absolutnej geometrii przestrzeni za pomocą funkcji określonych na V.

Można jednak spróbować określić je za pomocą funkcji określonych bezpośrednio na zbiorze E. Okazuje się, że odstępy czasu absolutnego można określić za pomocą pola kowektora (tj. wektora kowariantnego, stanowiącego tensor jednokrotnie kowariantny; zob. Kopczyński, Trautman 1981: 142–143), stałego w tym sensie, iż w pewnym układzie współrzędnych odpowiednie składowe kowektora stanowiącego jego wartość są jednakowe dla wszystkich zdarzeń. Kowektor ten w każdej punktochwili określa skalę absolutnego czasu dzięki temu, że pozwala każdemu wektorowi przypisać długość czasową. Z kolei absolutną geometrię przestrzeni momentalnych można, w nieco bardziej skomplikowany sposób, określić za pomocą stałego w powyższym sensie pola tensora dwukrotnie kontrawariantnego, w określonym sensie ortogonalnego do pola kowektorowego reprezentującego czas absolutny.

Przedefiniujmy symbole 'τ' i 'h' tak, by oznaczały pola tensorowe określające, odpowiednio, czas absolutny i absolutną geometrię przestrzeni. Wspomniany warunek ortogonalności można teraz zapisać w postaci równości $t_a\, h^{ab} = 0$ (por. Bain 2004: 347; z uwagi na ujednolicenie oznaczeń z cytowaną literaturą, składowe kowektora τ będziemy tu oznaczać przez t_a), gdzie zgodnie z tzw. konwencją o sumowaniu wykonuje się sumowanie po wszystkich czterech wartościach abstrakcyjnego wskaźnika a. Czasoprzestrzeń Leibniza można teraz określić jako trójkę (E, τ, h).

Alternatywnym dla przestrzeni V środkiem wprowadzenia struktury przestrzeni afinicznej jest określenie w czasoprzestrzeni płaskiej koneksji afinicznej. W ogólności koneksja afiniczna pozwala określić przeniesienie równoległe tensora wzdłuż dowolnej krzywej. Specyfika koneksji płaskiej polega na tym, że jest ona „całkowalna", tj. określone za jej pomocą przeniesienie równoległe między dwiema punktochwilami nie zależy od linii, wzdłuż której się dokonało. Nasuwa się wobec tego przedefiniowanie w określeniu struktury czasoprzestrzeni Galileusza symboli 'τ' i 'h' jak wyżej, a symbolu 'V' właśnie jako płaskiej koneksji afinicznej (por. Kopczyński, Trautman 1981: 146–147, 153), spełniającej odpowiedni warunek zgodności z pozostałymi elementami struktury.

Warunek taki pozwala znaleźć pewna funkcja koneksji afinicznej, jaką jest określanie tzw. pochodnej kowariantnej tensora. To z kolei umożliwia określenie cechy pola tensorowego, jaką jest jego kowariantna stałość, którą można zdefiniować za pomocą warunku zerowania się jego pochodnej kowariantnej, tj. w danym przypadku, odpowiednio, $\nabla_a t_b = 0$ i $\nabla_c h^{ab} = 0$. Warunek kowariantnej stałości wyraża w sposób niezależny od układu współrzędnych stałość obu pól tensorowych, określoną wyżej w sposób bardziej elementarny, więc naturalne jest przyjąć go jako warunek zgodności koneksji z tymi polami (por. Bain 2004: 347), skądinąd właśnie z założenia stałymi.

Aby przejść od czasoprzestrzeni Galileusza do czasoprzestrzeni Newtona w nowej stylizacji, trzeba z kolei przedefiniować symbol 'e', określający absolutną kolokację. Dość naturalne jest przypisanie go do pewnego pola wektora, czyli tensora jednokrotnie kontrawariantnego, czasowo jednostkowego, tj. spełniającego warunek $t_a e^a = 1$ (por. Kopczyński, Trautman 1981: 58, 82, 143; Bain 2004: 348). Pole takie w każdej punktochwili wyznacza wyróżniony lokalny standard spoczynku, co pozwala je określić jako eter geometryczny (stąd oznaczenie '*e*'), gdyż przy założeniu, że przestrzeń wypełnia materialny eter, w każdej punktochwili lokalnie byłby określony spoczynek względem niego (Kopczyński, Trautman 1981: 58). Skoro zaś ma ono zastąpić jeden wektor określony dla całej czasoprzestrzeni, powinno być stałe w tym samym sensie, co pozostałe elementy struktury, mianowicie kowariantnie stałe, tj. spełniać warunek $\nabla_a e^b = 0$ (por. Christian 1997: 4848; Trautman 1966: 419–420). Czasoprzestrzeń Galileusza (E, V, τ, h) można teraz potraktować jako wynik wzbogacenia czasoprzestrzeni Leibniza (E, τ, h) o zgodną z jej strukturą płaską koneksję afiniczną, zaś czasoprzestrzeń Newtona (E, V, τ, h, e) – jako wynik wzbogacenia czasoprzestrzeni Galileusza o kowariantnie stałe pole wektora czasowo jednostkowego.

Jak pamiętamy, tym, czego brakuje czasoprzestrzeni Leibniza, był element pozwalający wyróżnić klasę inercjalnych układów odniesienia. W czasoprzestrzeni Galileusza takim elementem jest płaska koneksja afiniczna. Oczywiście Leibniz, który pojęciem koneksji afinicznej nie dysponował, nie mógł takiego rozwiązania zastosować. Nawet zresztą gdyby nim dysponował, mógłby nie być chętny do skorzystania zeń, gdyż wprowadzenie absolutnej koneksji afinicznej pozwala wyróżnić ruchy w absolutnym sensie nieprzyśpieszone, co jest sprzeczne z ideą względności ruchu.

Rozwiązanie, które zastosował Newton, sprowadza się do uzupełnienia absolutnej struktury czasoprzestrzeni o element pozwalający, łącznie z pozostałymi, taką koneksję zdefiniować. Tym elementem jest stały eter geometryczny. Elementy struktury czasoprzestrzeni Leibniza pozwalają określić klasę zgodnych z nimi koneksji afinicznych, tzw. koneksji leibnizjańskich (Bain 2004: 349–350). Warunek, by chodziło o koneksję płaską, zawęża tę klasę, ale nie wyznacza koneksji jednoznacznie. Należy jeszcze dodać warunek, by eter geometryczny, jako dodatkowy element, był względem poszukiwanej koneksji kowariantnie stały (Christian 1997: 4848), co już pozwala ją zdefiniować, nawet nie zakładając z góry, że jest płaska. Oznacza to, że czasoprzestrzeń Newtona (E, V, τ, h, e) można równoważnie określić jako czwórkę (E, τ, h, e), której elementy spełniają przedstawione wyżej warunki, tj. wszystkie trzy pola tensorowe określające jej strukturę są kowariantnie stałe względem pewnej koneksji afinicznej.

Oczywiście Newton nie wprowadził tego elementu do czasoprzestrzeni w ten sposób, lecz za pomocą pojęcia absolutnego spoczynku. Z kolei to pojęcie znalazło uzasadnienie w koncepcji absolutnej przestrzeni, wprawdzie kontrowersyjnej, ale zrozumiałej dla współczesnych. To właśnie brak sformułowanej wyraźnie alternatywy dla tego rozwiązania sprawił, że powszechnie uważa się Clarke'a, reprezentującego pogląd Newtona, za zwycięzcę w sławnej polemice z Leibnizem.

Dynamiczny eter i uwzględnienie grawitacji

Rzecz jasna, dla Leibniza rozwiązanie Newtona było jeszcze trudniejsze do przyjęcia niż wprowadzenie absolutnej koneksji afinicznej, gdyby coś takiego mógł w ogóle rozważać. Co więcej, z jego punktu widzenia niedopuszczalne byłoby wprowadzenie elementu, który pozwoliłby nadać absolutny sens jakiejkolwiek charakterystyce ruchu, niekoniecznie prędkości, czy nawet przyśpieszeniu. Czyżby wobec tego był od początku skazany na porażkę? Szansę dla niego stwarza spostrzeżenie, że bezwładność, definiująca układy inercjalne, jest zjawiskiem dynamicznym, związanym ze specyfiką zachowania się obiektów materialnych, jakimi są ciała swobodne. Być może więc element, o który należałoby wzbogacić czasoprzestrzeń Leibniza, aby wyróżnić w niej klasę układów inercjalnych, nie powinien być absolutny, lecz dynamiczny (zob. Kopczyński, Trautman 1981: 158; Anderson 1967: 83)?

Okazuje się, że Leibniz miał w zanadrzu takie właśnie rozwiązanie. Jako kartezjanin, był przekonany, że nie ma dosłownie rozumianej próżni, lecz ciała poruszające się „w próżni" są w rzeczywistości zanurzone w materialnym eterze, a ich bezwładność nie jest związana z ruchem absolutnym, lecz z ruchem względem eteru (Czerniawski 2009: 71; por. Leibniz 1969: 34; Reichenbach 1958: 212). W ramach geometrii czasoprzestrzeni rozwiązanie to jest równoważne wprowadzeniu eteru geometrycznego jako dynamicznego elementu struktury.

Z każdym konkretnym określeniem eteru można związać koneksję leibnizjańską za pomocą nieco słabszego niż dotychczas rozważany warunku zgodności, jakim jest wymaganie, by w jej sensie eter był bezwirowy oraz geodezyjny (zob. Bain 2004: 357), tj. styczny do definiowalnych za jej pomocą geodezyjnych czasopodobnych. Oznacza to, że czwórka (E, τ, h ; e), którą można nazwać wzbogaconą czasoprzestrzenią Leibniza, równoważna jest piątce (E, τ, h ; Γ, e), gdzie średnik oddziela absolutne elementy struktury od elementów dynamicznych, a Γ jest koneksją leibnizjańską zgodną w powyższym sensie z dynamicznym eterem geometrycznym. W szczególności, gdy eter spełnia mocniejszy warunek kowariantnej stałości, koneksja ta jest płaska, a struktura czasoprzestrzeni różni się od struktury czasoprzestrzeni Newtona (E, V, τ, h, e) tylko tym, że eter i koneksja są z założenia dynamiczne. Struktura ta jest jednak wystarczająco bogata, by umożliwić nie tylko wyróżnienie klasy układów inercjalnych, ale i określenie pewnego odpowiednika absolutnego spoczynku, którym jest w niej spoczynek względem eteru, podczas gdy układy inercjalne wyróżnia nie ruch w absolutnym sensie nieprzyśpieszony, lecz ruch nieprzyśpieszony względem eteru.

W kontekście mechaniki nierelatywistycznej bez grawitacji rozwiązania Newtona i Leibniza są równoważne. Zaleta rozwiązania Leibniza, który niestety nie sformułował go wprost, ujawnia się za to w kontekście teorii grawitacji. Można bowiem rozważać interpretację grawitacji jako strumienia „substratu" porywającego ciała w nim zanurzone i „ściekającego" ruchem przyśpieszonym do centrum grawitacji (Czerniawski 2009: 163; por. Trautman 1966: 424; Hamilton, Lisle 2008: 519). Odpowiada to przejęciu roli układów inercjalnych przez lokalne układy swobodnie spadające, zaś roli absolutnego spoczynku przez pewien dynamiczny eter geometryczny, określony przez spoczynek względem „substratu".

W kontekście fizyki nierelatywistycznej, z grawitacją lub bez, w związku z eterem geometrycznym we wzbogaconej czasoprzestrzeni Leibniza pojawia się kłopot analogiczny do kłopotu z absolutnym spoczynkiem (czy też absolutnym eterem) w czasoprzestrzeni Newtona: nie jest on definiowalny na podstawie obserwacji, tj. nie można go na ich podstawie jednoznacznie określić. Kłopotu tego jednak można pozbyć się w sposób analogiczny do sposobu, w jaki sposób pozbyto się tamtego, a mianowicie abstrahować od konkretnego określenia eteru, eliminując go ze struktury z pozostawieniem definiowalnej za jego pomocą koneksji. Podobnie jak poprzednio czasoprzestrzeń Galileusza (E, V, τ, h), otrzymuje się wtedy nową strukturę czasoprzestrzeni w postaci czwórki $(E, \tau, h\ ;\ \Gamma)$, która jest czasoprzestrzenią geometrycznego sformułowania teorii grawitacji Newtona i w związku z tym, z uwagi na nazwisko pioniera tego sformułowania, zasługuje na miano czasoprzestrzeni Cartana (zob. Czerniawski 2009: 163) bądź Newtona-Cartana (zob. Penrose 2006: 377–378). W szczególnym przypadku, gdy źródła pola grawitacyjnego są nieobecne, przechodzi ona w strukturę praktycznie równoważną czasoprzestrzeni Galileusza w tym samym sensie, w którym analogiczny szczególny przypadek wzbogaconej czasoprzestrzeni Leibniza jest równoważny czasoprzestrzeni Newtona.

Wprowadźmy doniosłe rozróżnienie, odróżniając absolutną strukturę czasoprzestrzeni od jej pełnej struktury. W czasoprzestrzeniach Newtona, Galileusza i Leibniza obie struktury się pokrywają. Natomiast we wzbogaconej czasoprzestrzeni Leibniza i w czasoprzestrzeni Cartana odróżnienie to staje się nietrywialne. Absolutna struktura jest w nich reduktem (zob. Wójcicki 1974: 104, 270) pełnej struktury (Czerniawski 2009: 161), czyli strukturą powstałą z niej przez eliminację pewnych jej elementów, przy czym w obu przypadkach reduktem tym jest struktura czasoprzestrzeni Leibniza – obojętne, czy dana czasoprzestrzeń jest zakrzywiona i odpowiada przypadkowi z grawitacją, czy płaska i odpowiada przypadkowi, gdy nie ma źródeł pola grawitacyjnego. W przyszłości zapoznamy się z przypadkami, gdy odróżnienie to będzie jeszcze bardziej nietrywialne, a zarazem bardziej doniosłe.

Struktury czasoprzestrzeni fizyki relatywistycznej

Powyższe analizy można uznać za sztukę dla sztuki, bo przecież fizyka nierelatywistyczna jest już nieaktualna. Aby jednak w pełni zrozumieć koncepcję czasoprzestrzeni odpowiadającą fizyce relatywistycznej, warto ją porównać z koncepcją wcześniejszą. Efektywność tego porównania wymaga jakiejś wspólnej płaszczyzny.

W przypadku bez grawitacji w roli takiej podstawy może wystąpić wyrażenie odpowiedniej struktury czasoprzestrzeni w stylizacji zastosowanej pierwotnie do wyrażenia struktur czasoprzestrzeni fizyki nierelatywistycznej bez grawitacji. Opisującej ten przypadek szczególnej teorii względności (STW) odpowiada czasoprzestrzeń Minkowskiego, która jest przestrzenią afiniczną z metryką Minkowskiego. W przyjętej stylizacji jej strukturę można przedstawić jako trójkę (E, V, g) (zob. Kopczyński, Trautman 1981: 84), gdzie symbole „E" i „V" mają te same znaczenia co uprzednio, co oznacza, że czasoprzestrzeń Minkowskiego jest przestrzenią afiniczną, natomiast g jest funkcją (formą) biliniową na V o wartościach rzeczywistych, stanowiącą iloczyn skalarny na V, który nie jest dodatnio określony, gdyż nie dla wszystkich wektorów v z V niezerowych, tj. takich, że nie zachodzi $g(v,u) = 0$ dla dowolnych u z V, wielkość $g(v,v)$ jest dodatnia, a ponadto dla niektórych z nich $g(v,v) = 0$ (Kopczyński, Trautman 1981: 86). Pośrednio, iloczyn skalarny g pozwala określić na E pewną metrykę czasoprzestrzeni, zwaną metryką Minkowskiego, która faktycznie jest pseudometryką, gdyż nie jest, w analogicznym sensie, dodatnio określona.

Niestety, struktura czasoprzestrzeni Minkowskiego jest zbyt uboga, by można ją było bezpośrednio porównać ze strukturą czasoprzestrzeni Galileusza, odpowiadającą fizyce nierelatywistycznej bez grawitacji. Spróbujmy więc wyjść od struktury czasoprzestrzeni odpowiadającej elektrodynamice nierelatywistycznej. Oprócz struktury odpowiadającej mechanice nierelatywistycznej, zawiera ona eter geometryczny, co jest konsekwencją założonego istnienia eteru materialnego jako substancjalnego „nośnika" pola elektromagnetycznego. W przyjętej stylizacji jest on reprezentowany przez czasowo jednostkowy wektor e. Ponadto, jest w niej określona stała c o wymiarze prędkości, równa co do wartości prędkości światła w próżni. Można ją więc określić jako szóstkę (E, V, τ, h, e, c).

Łatwo zauważyć, że dla każdego wektora v, wektor $u = v - e\,\tau(v)$ jest wektorem przestrzennym, gdyż $\tau(u) = \tau(v - e\,\tau(v)) = \tau(v) - \tau(e)\tau(v) = 0$, bo

$\tau(e) = 1$. Można teraz, z dokładnością do znaku, który jest kwestią umowy (por. Penrose 2006: 395), zdefiniować metrykę Minkowskiego wzorem: $g(u,v) = c\,{}^{2}\tau(u)\tau(v) - h(u - e\ \tau(u),\ v - e\ \tau(v))$ (Kopczyński, Trautman 1981: 82). Powyższa szóstka jest więc równoważna siódemce (E, V, g, τ, h, e, c).

Łatwo zauważyć, że reduktem tej struktury jest czasoprzestrzeń Minkowskiego. Warto byłoby jednak nieco ją „odchudzić”. Przede wszystkim więc, powyższy wzór pozwala zdefiniować stałą c jako równą pierwiastkowi kwadratowemu z $g(e,e)$. Z kolei eter można zdefiniować przez warunek jego czasowej jednostkowości i ortogonalności do dowolnego wektora przestrzennego, tj. $\tau(e) = 1$ i $g(e,\ v - e\ \tau(v)) = 0$ dla każdego v. Powyższa struktura, którą nazwiemy tu czasoprzestrzenią Lorentza, jest więc równoważna piątce (E, V, g, τ, h), której reduktem jest nie tylko czasoprzestrzeń Minkowskiego, ale i czasoprzestrzeń Galileusza. Co więcej, dzięki temu, że pierwszy z wykorzystanych tu wzorów pozwala zdefiniować h za pomocą g i τ, zaś τ za pomocą g i e, jest ona też równoważna czwórkom (E, V, g, τ) i (E, V, g, e) (por. Kopczyński, Trautman 1981: 83). Z uwagi jednak na porównanie struktur pozostaniemy przy wspomnianej piątce.

Skoro czasoprzestrzeń Leibniza jest reduktem struktury czasoprzestrzeni Lorentza, to mogłoby się nasuwać zastosowanie takiego samego zabiegu, jak w ramach fizyki nierelatywistycznej, tj. potraktowanie elementów struktury „wystających” poza strukturę czasoprzestrzeni Leibniza jako dynamicznych. W przypadku elementu wprowadzającego strukturę przestrzeni afinicznej można byłoby odwołać się do takich samych argumentów jak uprzednio. Podobnie, można byłoby twierdzić, że metryka czasoprzestrzeni nie powinna być elementem absolutnym, gdyż uzależniona jest od dynamiki rządzącej rozprzestrzenianiem się oddziaływań, w tym oddziaływań elektromagnetycznych.

Co więcej, przemawia za tym wzgląd na potraktowanie czasoprzestrzeni szczególnej teorii względności jako szczególnego przypadku czasoprzestrzeni teorii ogólnej, mianowicie przypadku bez grawitacji. W OTW zaś zarówno metryka, jak i definiowalna za jej pomocą koneksja afiniczna, są dynamicznymi elementami struktury. Niestety, inaczej niż w ramach fizyki relatywistycznej, elementy struktury czasoprzestrzeni Leibniza nie mają w tych ramach jednoznacznego sensu operacyjnego, więc są w określonym sensie niefizyczne, podobnie jak eter w czasoprzestrzeni nierelatywistycznej. Jeśli więc struktura czasoprzestrzeni STW miałaby w ogóle mieć jakieś elementy absolutne, to może się wydawać, że do takiej roli kandydować powinny raczej element zadający strukturę przestrzeni afinicznej i metryka, zaś czasoprzestrzeń Lorentza powinna zostać potraktowana jako patologiczna w tym samym sensie, w jakim była taka czasoprzestrzeń Newtona.

Z drugiej strony, pojawia się ten sam problem, co w przypadku nierelatywistycznym, z porównaniem w przyjętej stylizacji czasoprzestrzeni STW z czasoprzestrzenią relatywistycznej teorii grawitacji, którą jest OTW. Spróbujmy wobec tego przezwyciężyć ten problem w sposób analogiczny do zastosowanego w tamtym przypadku. W określeniu czasoprzestrzeni Minkowskiego jako trójki (E, V, g), symbol ‘V’ będziemy teraz rozumieć jako oznaczający płaską koneksję afiniczną, a ‘g’ – pole dwukrotnie kowariantnego tensora metrycznego, kowariantnie stałego względem tej koneksji, określającego na E metrykę Minkowskiego. Nazwijmy czasoprzestrzenią Einsteina trójkę (E ; Γ, g), gdzie tensor g nie określa już płaskiej metryki Minkowskiego, lecz jej uogólnienie, jakie stanowi metryka lorentzowska (zob. Heller 1988: 39; Penrose 2006: 386, 390), zaś Γ jest tzw. metryczną koneksją afiniczną, definiowalną za pomocą tensora metrycznego (Kopczyński, Trautman 1981: 152). W ten sam sposób zresztą w czasoprzestrzeni Minkowskiego można za pomocą metryki zdefiniować zgodną z nią płaską koneksję afiniczną. Czasoprzestrzenie Minkowskiego i Einsteina można więc równoważnie określić jako, odpowiednio, dwójki (E, g) i (E ; g). Czasoprzestrzenią OTW jest taka czasoprzestrzeń Einsteina, w której tensor metryczny spełnia równanie Einsteina.

Stosunek czasoprzestrzeni STW do czasoprzestrzeni OTW zależy od przyjętej w jej ramach wersji równania Einsteina, a konkretnie od wartości stałej kosmologicznej. Z pewnością ta pierwsza jest lokalnym przybliżeniem tej drugiej, będąc dla niej przestrzenią styczną w każdej punktochwili. Jeśli jednak stała kosmologiczna ma wartość zerową, to ponadto jest strukturą równoważną jej szczególnemu przypadkowi, odpowiadającemu światu bez źródeł pola grawitacyjnego, czyli w określonym sensie pustemu. Różnica polega na tym, że w tym szczególnym przypadku czasoprzestrzeni Einsteina metryka i koneksja afiniczna są elementami dynamicznymi, a nie absolutnymi. Natomiast przy niezerowej wartości stałej kosmologicznej „pustemu” światu odpowiada czasoprzestrzeń de Sittera lub anty-de Sittera (Stephani 2004: 365–366).

Oczywiście bardziej w duchu Leibniza byłby wybór w roli czasoprzestrzeni STW nie czasoprzestrzeni Minkowskiego, lecz tego szczególnego przypadku czasoprzestrzeni Einsteina. Nadal jednak nie widać tu zastosowania dla struktury czasoprzestrzeni Leibniza. Lepiej z tego punktu widzenia wyglądałaby sytuacja, gdyby czasoprzestrzeni STW można było przypisać strukturę czasoprzestrzeni Lorentza. Należałoby jednak jakoś odeprzeć zarzut jej patologiczności.

Pomocne ze względu na ten cel okazuje się odróżnienie od fizycznej geometrii czasoprzestrzeni jej absolutnej geometrii tła. Pojawiło się ono w kontekście pewnej interpretacji OTW, zaproponowanej jako rozwiązanie problemu określenia energii pola grawitacyjnego w ogólnej teorii względności (Rosen 1940a: 147). W interpretacji tej wzbogacono czasoprzestrzeń Einsteina o strukturę czasoprzestrzeni Minkowskiego. Powstała w ten sposób struktura obejmująca struktury obu tych czasoprzestrzeni jako swoje redukty. Zamiast jednej geometrii, czasoprzestrzeń o takiej strukturze ma dwie, z których pierwsza, określona przez dynamiczną metrykę ogólnej teorii względności, stanowi jej geometrię fizyczną, a druga, określona przez metrykę Minkowskiego, jest jej absolutną geometrią tła. Ze względu na te dwie metryki, interpretację tę można nazwać interpretacją (lub teorią, jeśli chcieć potraktować ją jako alternatywę dla OTW) dwumetryczną (Kopczyński, Trautman 1981: 160) bądź bimetryczną (Rosen 1985: 997).

Aby w przyjętej tu stylistyce określić strukturę czasoprzestrzeni takiej bimetrycznej interpretacji OTW, w celu uniknięcia kolizji oznaczeń przyjmijmy dla tensora określającego metrykę Minkowskiego symbol 'η'. Strukturę czasoprzestrzeni Minkowskiego można teraz określić jako (E, V, η), bądź równoważnie jako (E, η), zaś strukturę czasoprzestrzeni interpretacji bimetrycznej jako trójkę (E, η ; g), bądź równoważnie jako piątkę (E, V, η ; Γ, g). Ponieważ jednak, w odróżnieniu od dynamicznej koneksji afinicznej, określającej klasę wyróżnionych układów odniesienia, jakimi są lokalne układy inercjalne, status absolutnej jest niejasny, bezpieczniej jest ze względu na porównanie struktur określić tę czasoprzestrzeń, którą nazwiemy tu czasoprzestrzenią Rosena, jako czwórkę (E, η ; Γ, g).

Z drugiej strony, można twierdzić, że niejasny jest też status metryki tła, m.in. ze względu na definiowalność za jej pomocą problematycznej koneksji, a zatem również całej geometrii tła. Pierwsza przymiarka do jego wyjaśnienia polegała na porównaniu zakrzywionej geometrii czasoprzestrzeni OTW z płaską geometrią czasoprzestrzeni STW, jaką miałaby ona, gdyby usunąć z niej grawitację (Rosen 1940a: 147). Nie wiadomo jednak, jakie znaczenie ze względu na określenie wielkości w jednej z porównywanych czasoprzestrzeni mogłaby mieć metryka drugiej. Później spróbowano innej interpretacji, polegającej na określeniu obu pól tensora metrycznego w tej samej czasoprzestrzeni, jednak odmawiając metryce fizycznej funkcji określania geometrii i interpretując ją jako wielkość fizyczną wyrażającą pole grawitacyjne (Rosen 1940b: 150). Tu z kolei problem stwarza fakt prostego, jednoznacznego związku właśnie metryki fizycznej z pomiarami geometrycznymi i chronometrycznymi, którego metryka tła jest pozbawiona.

Protofizyka a status geometrii tła

W nowym świetle pozwala zobaczyć status geometrii tła program protofizyki. Pierwowzorem dla badań protofizycznych była refleksja A. Einsteina nad operacyjnym sensem wielkości fizycznych i związany z tym wymóg, by wielkości te taki sens posiadały. H. Dingler, prekursor protofizyki, uznał potrzebę takiej refleksji, jednak był krytyczny wobec faktu, że w swoich analizach Einstein oparł określenie tego sensu na operacjach pomiarowych za pomocą przyrządów podlegających relatywistycznym efektom skrócenia długości i dylatacji czasu, tj. spowolnienia procesów fizycznych w poruszającej się materii, jak również analogicznym efektom grawitacyjnym. W rezultacie, jak uważał, wyznaczone w ten sposób relacje przestrzenne i czasowe są w określonym sensie zdeformowane. Uznał więc, że oparta na tych analizach teoria względności jest wadliwa (Dingler 1920).

Refleksję Dinglera kontynuował autor programu protofizyki (Lorenzen 1961: 430) P. Lorenzen. Nie podzielał jednak negatywnego stosunku Dinglera do teorii względności, lecz tylko do relatywistycznej protofizyki, na której oparł ją Einstein. Próbował w związku z tym oprzeć ją na nowych podstawach, wypracowanych w ramach nowej protofizyki, która miała być wolna od wad tamtej. Sposób, w jaki próbował ten program uzasadnić w oparciu o zasadę, którą określał jako zasadę porządku pragmatycznego, czy też metodycznego, jest jednak dyskusyjny, podobnie jak sama zasada.

Znacznie bardziej przekonujące uzasadnienie można za to oprzeć na ukutej przez Dinglera idei „punktu zerowego” (Dingler 1923: 133, 141). W świetle tej idei, o wpływie ruchu i grawitacji na cechy ciał i przebiegających w nich procesów można sensownie mówić jedynie pod warunkiem, że do pomyślenia jest stan tych ciał i procesów, w jakim byłyby, gdyby tym wpływom nie podlegały. Miarą owych wpływów byłoby wtedy odchylenie ich faktycznego stanu od tak rozumianego „punktu zerowego”. Wobec zaś uniwersalności tych wpływów, takich ciał i procesów nie można byłoby znaleźć w przyrodzie, lecz należałoby je skonstruować jako pewne obiekty idealne analogiczne do podlegających im obiektów realnych. W szczególności dotyczy to dwóch wersji przyrządów do pomiarów przestrzenno-czasowych.

Lorenzen nie był przekonany do języka geometrii czasoprzestrzeni i w związku z tym nie był zainteresowany przełożeniem tych wyobrażeń na ten język. Problem ten za to zainteresował fizyka von Borzeszkowskiego, który w korespondencji z Lorenzenem zauważył (Borzeszkowski, Wahsner 1995: 7), że prowadzą one do przypisania czasoprzestrzeni, oprócz geometrii fizycznej, pewnej geometrii tła. Przy tym, świadomy istnienia bimetrycznej interpretacji teorii względności, uznał, że powinna nią być płaska geometria Minkowskiego, co oznaczałoby, że jej pełną geometrią powinna być geometria czasoprzestrzeni Rosena. Lorenzen w wyniku dyskusji zgodził się z tą sugestią – jak się przekonamy, dość pochopnie.

Zauważmy, że z idei „punktu zerowego” wynika, iż owe idealne przyrządy pozwalające określić geometrię tła powinny być niewrażliwe nie tylko na efekty grawitacyjne, ale i na efekty relatywistyczne związane z ruchem. Tymczasem przyrządy pozwalające określić ją jako geometrię czasoprzestrzeni Minkowskiego musiałyby zachowywać się jak realne przyrządy w szczególnej teorii względności, podlegające tego rodzaju efektom. Idei „punktu zerowego" powinny więc odpowiadać idealne przyrządy niewrażliwe również na te efekty (Czerniawski 2009: 45, 132, 171–172). Innymi słowy, przyrządy takie powinny zachowywać się tak, jak zakładano w ramach mechaniki nierelatywistycznej. Tam zaś pozwalały one określić jako absolutną geometrię tła geometrię czasoprzestrzeni Leibniza. Co więcej, w czasoprzestrzeni Minkowskiego określone jest absolutne przyśpieszenie ruchu, którego nie sposób zdefiniować w ramach protofizyki. Pełną geometrią czasoprzestrzeni odpowiadającą protofizyce nie powinna więc być geometria czasoprzestrzeni Rosena, lecz inna geometria, którą nazwiemy geometrią Lorenzena i określimy tu jako piątkę (E, τ, h ; Γ, g), bądź równoważnie jako czwórkę (E, τ, h ; g).

W szczególnym przypadku, odpowiadającym światu bez grawitacji, struktura czasoprzestrzeni Lorenzena pokrywałaby się z czasoprzestrzenią Lorentza (E, V, g, τ, h), różniąc się jednak od niej dynamicznym statusem geometrii fizycznej i koneksji afinicznej. Otrzymuje się wtedy czasoprzestrzeń zgodnej z postulatami protofizyki interpretacji szczególnej teorii względności. Sytuacja jest tu analogiczna do przypadku wzbogaconej czasoprzestrzeni Leibniza i czasoprzestrzeni Newtona, czy czasoprzestrzeni Cartana i Galileusza w fizyce nierelatywistycznej, pozwalając, podobnie jak wtedy, czasoprzestrzeń bez grawitacji ująć jako szczególny przypadek czasoprzestrzeni z grawitacją.

Pamiętamy, że status geometrii tła w czasoprzestrzeni Rosena był niejasny, gdyż nie ma ona jednoznacznego sensu operacyjnego, a tym samym ma charakter niefizyczny. Wydaje się, że jest to główny powód, dla którego rozwiązanie Rosena, mimo pewnych argumentów przemawiających na jego rzecz, nie przyjęło się i obecnie powszechnie teorię względności interpretuje się jako teorię bez absolutnego tła, czemu odpowiada czasoprzestrzeń Einsteina. Oczywiście do interpretacji protofizycznej można zgłosić to samo zastrzeżenie.

Chociaż jednak czasoprzestrzeń Leibniza, stanowiąca jej geometrię tła, również ma charakter niefizyczny, to jednak można jej przypisać charakter pośredni pomiędzy fizycznym a metafizycznym, mianowicie specyficznie protofizyczny. Jej elementy, chociaż pozbawione jednoznacznego sensu operacyjnego, mają jednak sens, który można określić jako quasi-operacyjny (Czerniawski 2009: 46). Można je bowiem zdefiniować na podstawie takich samych operacji pomiarowych, jak ich fizyczne odpowiedniki, lecz wykonanych za pomocą idealnych przyrządów, niepodlegających skutkom ruchu i grawitacji przewidywanych przez teorię względności. Wprawdzie takie przyrządy nie istnieją realnie, ale zarówno one, jak i wykonywane za ich pomocą operacje, są do pomyślenia.

Lorenzen uważał, że przyrządy takie wprawdzie nie istnieją, ale można je skonstruować (Lorenzen 1961). Alternatywnie, wyniki pomiarów za ich pomocą można otrzymać, poddając wyniki pomiarów za pomocą realnych przyrządów stosownej korekcie. Niestety, w związku z faktem, iż zarówno efekty relatywistyczne STW, jak i analogiczne efekty grawitacyjne, mają wszelkie cechy siły uniwersalnej w rozumieniu Reichenbacha (Reichenbach 1958: 12–13), żadna z tych operacji nie może dostarczyć wyników jednoznacznych, niezależnych od nierozstrzygalnych empirycznie założeń. Muszą więc one pozostać czysto teoretyczne, a określona w ich wyniku geometria tła, inaczej niż geometria fizyczna, pozostać niejednoznacznie związana z wynikami realnych pomiarów. Gdyby jednak istniały jakieś, jak dotąd nieznane, zjawiska łamiące zasadę równoważności, stanowiącą uogólnienie zasady względności Einsteina na przypadek z grawitacją, możliwe byłoby nadanie jej sensu operacyjnego w zwykłym sensie. Quasi-operacyjny sens określających ją wielkości można więc też określić jako ich warunkowy sens operacyjny (Czerniawski 2009: 46).

Warto zauważyć, że w ramach fizyki nierelatywistycznej eter geometryczny nie ma nawet sensu quasi-operacyjnego. W sytuacji, gdy spełniony jest nierelatywistyczny odpowiednik zasady równoważności, nie sposób pomyśleć operacji nawet za pomocą niefizycznych, idealnych przyrządów, która pozwoliłaby jednoznacznie określić absolutnie wyróżniony stan spoczynku. Jeśli więc nawet uważać, że struktura czasoprzestrzeni Lorenzena z racji zawierania elementów nieobdarzonych sensem operacyjnym jest w jakimś sensie patologiczna, to nie aż tak, jak czasoprzestrzeń Newtona, która zawiera elementy pozbawione nawet sensu quasi-operacyjnego.

Co ciekawe, status eteru polepsza się w fizyce relatywistycznej. Wprawdzie jego samego nie można zdefiniować ani operacyjnie, ani quasi-operacyjnie, ani obdarzone sensem quasi-operacyjnym elementy absolutnej geometrii tła nie pozwalają go zdefiniować, ale można go zdefiniować za pomocą τ i g, co oznacza, że czasoprzestrzeń Lorenzena można alternatywnie określić jako $(E, \tau, h\ ;\ g, e)$. W efekcie eter uzyskuje sens co najmniej quasi-operacyjny, a w niektórych szczególnych przypadkach nawet operacyjny – jak w wypadku standardowych modeli kosmologicznych z czasem kosmicznym.

Z drugiej strony zaś warto przypomnieć, że wprowadzenie absolutnego, statycznego eteru do czasoprzestrzeni wyposażonej w elementy struktury czasoprzestrzeni Leibniza pozwala zdefiniować w niej absolutną metrykę Minkowskiego. Nie widać zaś, jak można byłoby ją zdefiniować bez niego. Wskazuje to, że bez niego nawet wyposażenie czasoprzestrzeni w inne absolutne elementy struktury mające sens quasi-operacyjny nie wystarcza, by ją wyposażyć w metrykę Minkowskiego jako element absolutnej geometrii tła. Oznaczałoby to, że struktura czasoprzestrzeni Rosena jest w nie mniejszym stopniu patologiczna niż struktura czasoprzestrzeni Newtona, gdyż jej geometria tła nie tylko nie ma sensu operacyjnego, ale nawet quasi-operacyjnego.

Podsumowanie

Analiza wyobrażeń Newtona na temat czasu i przestrzeni pozwala uznać za najbliższą tym wyobrażeniom koncepcję czasoprzestrzeni jako iloczynu kartezjańskiego trójwymiarowej, euklidesowej przestrzeni i jednowymiarowego czasu, zwanej w związku z tym czasoprzestrzenią Newtona, która nieco mniej trafnie nazywana bywa też czasoprzestrzenią Arystotelesa. Natomiast wyobrażeniom Leibniza na ten temat, realizującym w pełni ideę względności ruchu, odpowiada czasoprzestrzeń Leibniza, rozumiana jako wiązka włóknista, której włóknami są trójwymiarowe, euklidesowe przestrzenie momentalne, a jednowymiarowy czas jest przestrzenią bazową. Żadna z tych struktur jednak nie odpowiada treści mechaniki nierelatywistycznej. Z jednej strony bowiem struktura czasoprzestrzeni Newtona jest zbyt bogata, gdyż zawiera absolutny standard spoczynku, niedefiniowalnego w ramach tej teorii, z drugiej zaś struktura czasoprzestrzeni Leibniza jest zbyt uboga, gdyż nie zawiera żadnego elementu odpowiadającego klasie ruchów swobodnych, niewątpliwie definiowalnej w ramach owej teorii.

Podczas gdy nadmiar struktury nie dyskwalifikuje czasoprzestrzeni jako modelu teorii, gdyż struktura jest wystarczająco bogata, by język teorii w niej zinterpretować, deficyt struktury wyklucza taką jej funkcję. Nic dziwnego, że wspomniany deficyt struktury czasoprzestrzeni Leibniza sprawił, iż za zwycięzcę sporu Leibniz-Clarke dość powszechnie uznano reprezentującego poglądy Newtona Clarke'a. Leibniz jednak miał w zanadrzu rozwiązanie, niestety niesformułowane wprost, równoważne wprowadzeniu do czasoprzestrzeni eteru geometrycznego. Pozwala ono zdefiniować koneksję afiniczną, a co za tym idzie, wyróżnić klasę geodezyjnych czasopodobnych, reprezentujących możliwe linie świata swobodnych punktów materialnych. Co więcej, w naturalny sposób uogólnia się je na przypadek z grawitacją, gdy w zastępstwie ruchów swobodnych występują swobodne spadki w polu grawitacyjnym.

Na pozór czasoprzestrzeń Leibniza jest nieporównywalna z czasoprzestrzeniami teorii względności. W przypadku teorii szczególnej jednak, płaszczyzny do porównania dostarcza elektrodynamika nierelatywistyczna w postaci czasoprzestrzeni Lorentza, w której, dzięki wprowadzeniu do czasoprzestrzeni Leibniza eteru geometrycznego i wyróżnionej prędkości, odpowiadającej rozprzestrzenianiu się oddziaływań elektromagnetycznych w eterze, można zdefiniować metrykę Minkowskiego, wystarczającą do określenia struktury czasoprzestrzeni STW. Co więcej, potraktowanie eteru jako dynamicznego elementu struktury pozwala odtworzyć tę płaszczyznę również w odniesieniu do przypadku z grawitacją, tj. do czasoprzestrzeni OTW.

Niestety, w takiej czasoprzestrzeni, w odróżnieniu od dynamicznej metryki czasoprzestrzeni, która ma jednoznaczny sens operacyjny, status elementów czasoprzestrzeni Leibniza jest niejasny. Do jego wyjaśnienia przyczynia się z jednej strony bimetryczna interpretacja OTW, wprowadzając pojęcie absolutnej geometrii tła, z drugiej zaś protofizyka, dostarczając pojęcia quasi-operacyjnego sensu elementów geometrii tła i nakładając na nią związane z tym ograniczenie. Okazuje się, że z jednej strony, przyjmowana zazwyczaj jako geometria tła, czasoprzestrzeń Minkowskiego nie spełnia wymagań protofizyki, z drugiej zaś – spełnia je właśnie czasoprzestrzeń Leibniza.

Bibliografia

Anderson J.L. (1967), *Principles of Relativity Physics*, New York: Academic Press.

Augustynek Z. (1972), *Własności czasu*, Warszawa: PWN.

Bain J. (2004), *Theories of Newtonian gravity and empirical indistinguishability*, „Studies in History and Philosophy of Modern Physics" 35, nr 3, s. 345–376.

Borzeszkowski von H.-H., Wahsner R. (1995), *Messung als Begründung oder Vermittlung? Ein Briefwechsel mit Paul Lorenzen über Protophysik und ein paar andere Dinge*, Sankt Augustin: Academia.

Christian J. (1997), *Exactly soluble sector of quantum gravity*, „Physical Review D" 56, nr 8, s. 4844–4877.

Czerniawski J. (2009), *Ruch, przestrzeń, czas: Protofizyczne i metafizyczne aspekty podstaw fizyki relatywistycznej*, Kraków: Wydawnictwo UJ.

Dingler H. (1920), *Kritische Bemerkungen zu den Grundlagen der Relativitätstheorie*, „Physikalische Zeitschrift" 21, s. 668–675.

Dingler H. (1923), *Die Grundlagen der Physik: Synthetische Prinzipien der mathematischen Naturphilosophie*, wyd. 2, Berlin: Gruyter.

Dingler H. (1938), *Die Methode der Physik*, München: Reinhardt.

Earman J. (1989), *World Enough and Space-Time*, Cambridge (Massachusetts): MIT Press.

Ehlers J. (1973), *The nature and structure of spacetime*, w: J. Mehra (red.), *The Physicist's Conception of Nature*, Dordrecht: D. Reidel, s. 71–91.

Gołosz J. (2001), *Spór o naturę czasu i przestrzeni: Wybrane zagadnienia filozofii czasu i przestrzeni Johna Earmana*, Kraków: Wydawnictwo UJ.

Hamilton A.J.S., Lisle J.P. (2008), *The river model of black holes*, „American Journal of Physics" 76, s. 519–532.

Heller M. (1988), *Teoretyczne podstawy kosmologii*, Warszawa: PWN.

Janich P. (1973), *Eindeutigkeit, Konsistenz und methodische Ordnung: normative versus deskriptive Wissenschaftstheorie zur Physik*, w: F. Kambartel, J. Mittelstrass (red.), *Zum normativen Fundament der Wissenschaft*, Frankfurt/M.: Athenäum, s. 131–158.

Kopczyński W., Trautman A. (1981), *Czasoprzestrzeń i grawitacja*, Warszawa: PWN.

Leibniz G.W. (1969), *Polemika z Clarke'iem*, w: tenże, *Wyznanie wiary filozofa*, przeł. S. Cichowicz, Warszawa: PWN, s. 321–448.

Lorenzen P. (1961), *Das Begründungsproblem der Geometrie als Wissenschaft der räumlichen Ordnung*, „Philosophia Naturalis" 6, nr 4, s. 415–431.

Lorenzen P. (1978), *Die allgemeine Relativitätstheorie als eine Revision der Newtonschen Gravitationstheorie*, „Philosophia Naturalis" 17, s. 1–9.

Lorenzen P. (1997), *Myślenie metodyczne*, przeł. i red. S. Blandzi, Warszawa: Wydawnictwo IFiS PAN.

Minkowski H. (1909), *Raum und Zeit*, „Physikalische Zeitschrift" 20, s. 104–111.

Newton I. (2011), *Matematyczne zasady filozofii przyrody*, przeł. J. Wawrzycki, Kraków: Copernicus Center Press.

Newton I. (2015), *Matematyczne zasady filozofii naturalnej*, przeł. S. Brzezowski, Kraków: Copernicus Center Press.

Penrose R. (2006), *Droga do rzeczywistości: Wyczerpujący przewodnik po prawach rządzących Wszechświatem*, przeł. J. Przystawa, Warszawa: Prószyński i S-ka.

Reichenbach H. (1958), *The Philosophy of Space and Time*, New York: Dover.

Rosen N. (1940a), *General Relativity and Flat Space. I*, „Physical Review" 57, s. 147–150.

Rosen N. (1940b), *General Relativity and Flat Space. II*, „Physical Review" 57, s. 150–153.

Rosen N. (1985), *Localization of gravitational energy*, „Foundations of Physics" 15, nr 10, s. 997–1008.

Stephani H. (2004), *Relativity: An Introduction to Special and General Relativity*, Cambridge: Cambridge University Press.

Torretti R. (1978), *Hugo Dingler's philosophy of geometry*, „Dialogos" 32, s. 85–128.

Trautman A. (1966), *Comparison of Newtonian and relativistic theories of space-time*, w: B. Hoffman (red.), *Perspectives in Geometry and Relativity*, Bloomington: Indiana Univ. Press, s. 413–425.

Wójcicki R. (1974), *Metodologia formalna nauk empirycznych*, Wrocław: Ossolineum.

Streszczenie

Koncepcji czasu i przestrzeni Leibniza odpowiada przyjęcie w roli absolutnej geometrii tła wiązki włóknistej z euklidesowymi przestrzeniami momentalnymi jako włóknami. Takie tło jednak nie uwzględnia wyróżnionego statusu inercjalnych układów odniesienia. Za odpowiednie absolutne tło dla fizyki nierelatywistycznej uważa się więc czasoprzestrzeń Galileusza, będącą taką wiązką włóknistą wzbogaconą o strukturę przestrzeni afinicznej. Za wyróżnienie układów inercjalnych powinien jednak odpowiadać dynamiczny element struktury czasoprzestrzeni. Absolutnym tłem dla mechaniki Newtona byłaby wtedy czasoprzestrzeń Leibniza, a owym elementem zgodna z absolutnym tłem koneksja afiniczna. Leibniz zamiast tego wprowadził eter, za pomocą którego można zdefiniować taką koneksję. Zaletą obu wersji tego rozwiązania jest możliwość uogólnienia go na teorię grawitacji i na czasoprzestrzenie fizyki relatywistycznej.