

MICHAŁ HELLER

CZAS I PRZYCZYNOWOŚĆ  
W OGÓLNEJ TEORII WZGLĘDNOŚCI

"Teraźniejszość jest zawsze brzemienne przyszłością... Żadnego naturalnego stanu nie da się inaczej wyjaśnić, jak tylko przez odwołanie się do stanu, który go bezpośrednio poprzedzał".  
Z listu Leibniza do Varignonona.

## 1. CZAS I PRZYCZYNOWOŚĆ - SYTUACJA PROBLEMOWA

Zasada przyczynowości nie cieszy się dobrą sławą w nowożytnej filozofii nauki. Powszechnie uważa się, że już D. Hume<sup>1</sup> ostatecznie wykazał, iż jedyną rzeczą, jaką nauka może uchwycić z tzw. związku przyczynowego jest tylko następstwo czasowe: zjawisko C, poprzedzające zjawisko E, można nazwać przyczyną zjawiska E, a zjawisko E, następujące po C, można nazwać jego skutkiem, ale nic ponadto. Nauka, chcąc pozostać wierna swojej metodzie, powinna zachować milczenie na temat związku przyczynowego.

A. J. Ayer<sup>2</sup>, analizując stanowisko Hume'a, uważa, że filozof ten w kwestii przyczynowości głosił trzy następujące tezy: Po pierwsze, związek przyczynowo-skutkowy nie ma charakteru logicznego, ponieważ jego zaprzeczenie nie prowadzi do sprzeczności. Po drugie, zasada przyczynowości nie da się analitycznie wyprowadzić z doświadczenia. I po trzecie, doświadczenie nie jest w stanie powiedzieć niczego na temat elementu konieczności w występowaniu jednych zjawisk po drugich. M. Bunge<sup>3</sup> w następujących słowach przedstawia to stanowisko: "Wyrażenie: Zawsze /i tylko/, jeżeli C, to E, jest ogólnym zdaniem warunkowym wyrażającym stały związek dwóch rodzajów zdarzeń. Nie stwierdza ono związku genetycznego, lecz tylko zewnętrzne połączenie, niezmienną koincydencję".

Stanowisko Hume'a wyraźnie podkreśla związek przyczynowości z czasowym następstwem zjawisk i przyznaje pierwszeń-

stwo czasowemu następstwu przed przyczynowością, a nawet - praktycznie rzecz biorąc - eliminuje przyczynowość na rzecz następstwa czasowego. Oczywiście nie brakło myślicieli, którzy postępowali dokładnie odwrotnie, starając się wywieść pojęcie czasu ze związku przyczynowego pomiędzy zdarzeniami. Dało to początek tzw. przyczynowej teorii czasu, za której twórcę można uznać Leibniza.

Czy teorie naukowe mówią cokolwiek na temat przyczynowości? Czy następstwo czasowe eliminuje przyczynowość, czy też - przeciwnie - czas /lub jego nieodwracalność/ można wywieść z czegoś co przynajmniej imituje związek przyczynowy w teoriach naukowych? Mimo nieco życzliwszych nastrojów w stosunku do przyczynowości<sup>4</sup>, dyskusja na te tematy jest daleka od zakończenia. Sposób w jaki ta dyskusja jest prowadzona współcześnie, może służyć za przykład interesującego zjawiska: tradycyjnie głębokie zagadnienia filozoficzne /przyczynowość i czas niewątpliwie należą do "wielkich problemów filozoficznych"/ umieszczone w kontekście teorii naukowych nabierają nowych odcieni znaczeniowych; teorie te nie tylko służą jako "szczególne przypadki" funkcjonowania zasad ogólnych, ale niekiedy pozwalają sformułować nową hipotezę filozoficzną i dostarczają argumentów, przemawiających na jej korzyść. Myślę, że tak się właśnie ma sprawa z problemem przyczynowości i czasu.

W niniejszym artykule problem przyczynowości i czasu umieszczę w kontekście ogólnej teorii względności. W ostatnich kilkunastu latach w strukturze matematycznej tej teorii wyróżniono tzw. strukturę przyczynową i zawartą w niej /w pewnym znaczeniu tego wyrażenia/ strukturę chronologiczną. Fizyczny sens obu struktur w pełni uzasadnia rozpatrzenie w nawiązaniu do nich zagadnień czasu i przyczynowości. Moje analizy rozpocznę od kilku szkiców wprowadzających do historii zagadnienia. Historia jest już zawsze trochę filozofią i bardzo często oszczędza onawiele żmudnych rozróżnień metodologicznych. Następnie przypomnę elementarne wiadomości na temat przyczynowej i chronologicznej struktury ogólnej teorii względności. Język tych struktur pozwala w ekonomiczny i precyzyjny sposób wyrazić to, co dawniej wyrażano za pomocą bardzo skomplikowanych formalizmów lub długich omówień słownych. Co więcej, prostota języka pozwala postąpić znacznie dalej w ana-

lizach, niż to było dotychczas możliwe. Nic zatem dziwnego, że wykorzystanie już tylko elementarnej analizy metodologicznej pozwoli na wyciągnięcie wniosków, które mogą okazać się wysoce interesujące.

## 2. LEIBNIZA PRZYCZYNOWA KONCEPCJA CZASU

Znane zdanie Leibniza z jego trzeciego listu do Samuela Clarke'a<sup>5</sup> "czas stanowi porządek następstwa rzeczy" /podobnie jak przestrzeń "porządek ich współzistnienia"/ było wielokrotnie komentowane i interpretowane na różne sposoby<sup>6</sup>. Na ogół przypisuje się Leibnizowi przekonanie, że świat jest zbiorem zdarzeń, a czas /podobnie jak przestrzeń/ stanowi pewną relację porządkującą ten zbiór. Można oczywiście "w duchu filozofii Leibniza" budować różne modele czasu, wykorzystując topologiczne pojęcie uporządkowania zbioru, ale trzeba zdawać sobie sprawę z tego, że Leibniz był bardzo daleki od rozumienia porządku tak, jak porządek rozumie dzisiejsza topologia. Henryk Mehlberg, w drobiazgowym studium poświęconym koncepcji czasu<sup>7</sup> zauważa, że Leibniz swoją "relacyjną" definicję czasu traktował przede wszystkim jako polemikę z "angielskim" rozumieniem czasu jako swojego rodzaju substancji /w ten sposób czas pojmowali Henry More, Newton i Clarke/. W substancjalistycznej koncepcji czasu porządek zdarzeń jest wtórny w stosunku do porządku chwil: zdarzenie A poprzedza zdarzenie B, jeżeli chwila, w której zachodzi zdarzenie A, poprzedza chwilę, w której zachodzi zdarzenie B. Dla Leibniza natomiast "zewnętrzne wobec rzeczy chwile nie są niczym i polegają wyłącznie na porządku następczym tych rzeczy"<sup>8</sup>. Jest to, w pewnym sensie, negatywna część doktryny Leibniza o relacyjności czasu. Na czym polega jej część pozytywna?

W 1716 r., w roku swojej śmierci, Leibniz napisał krótką rozprawkę zatytułowaną "Metafizyczne podstawy matematyki"<sup>9</sup>. Okazji do jej napisania dostarczył Leibnizowi Christian Wolf swoim niedawnym artykułem w "Acta Eruditorum". W rozprawce znajduje się zaledwie kilkanaście zdań, zawierających myśli Leibniza na temat przyczynowej koncepcji czasu. Dopiero Cassirer i Reichenbach zwrócili uwagę na doniosłość tego fragmentu<sup>10</sup>.

Najpierw należy umieścić stanowisko Leibniza w kontekście jego poglądów ogólnofilozoficznych. Podobnie jak Kar-

tezjusz, który uświadomił nowożytnym rolę przestrzeni /materia = rozciągłość/, Leibniz wyczulił nas na dostrzeganie czasu w strukturze świata. Leibnizowska wizja świata jest dynamiczna. Materia sprowadza się do centrów sił, nieustannie oddziaływujących na siebie i sprawiających, że stany Wszechświata następują po sobie w sposób ciągły i płyną jak sam czas. Tu właśnie należy umieścić wypowiedź Leibniza, wybraną za motto niniejszego artykułu: "Tężejność jest zawsze brzemienne przyszłością [...] żadnego naturalnego stanu nie da się inaczej wyjaśnić, jak tylko przez odwołanie się do stanu, który go bezpośrednio poprzedza"<sup>11</sup>. Pamiętać również należy, że światem Leibniza rządzą zasady logiczne i zasada racji dostatecznej. Jeżeli stany Wszechświata ułożyć w ciąg w ten sposób, by stan poprzedni ciągu zawierał rację stanu następnego, to tym samym otrzymamy czasowe uporządkowanie stanów świata. Ponieważ zaś - zdaniem Leibniza - zasada racji jest w istocie równoważna zasadzie przyczynowości /"[...] nic nie jest bez racji, czyli że żaden skutek nie jest bez przyczyny" - pisze Leibniz podkreślenie jego w "Prawdach pierwotnych metafizyki"<sup>12</sup>/, więc czas okazuje się czymś pochodnym w stosunku do przyczynowości. Czas posiada więc strukturę relacyjną, ale relacje tworzące czas sprowadzają się do stosunków przyczynowych pomiędzy stanami świata.

Mehlberg<sup>13</sup> z naciskiem podkreśla, że nie mamy prawa narzucać Leibnizowi dzisiejszych poglądów i dopatrywać się u niego początków relatywistycznego /w sensie teorii względności/ widzenia świata, w którym może istnieć wiele, niesprowadzalnych do siebie /w żaden prosty sposób/, ciągów czasowo uporządkowanych zdarzeń. Leibniz, przynajmniej milcząco, zakładał możliwość nieskończonego szybkiego rozchodzenia się oddziaływań pomiędzy substancjami, co pozwalało mu sensownie mówić o wszystkich równoczesnych "współistniejących substancjach" we Wszechświecie. A zatem Leibnizowski, relacyjny czas to nie tyle ciąg zdarzeń, uporządkowanych stosunkiem racji-następstwa, ile raczej ciąg w ten sposób uporządkowanych stanów Wszechświata. W świecie Leibniza istnieje zatem jeden, uniwersalny czas, a nie wiele czasowo uporządkowanych ciągów zdarzeń. Ale - zdaniem Mehlberga - wystarczyłoby wprowadzić do świata Leibniza założenie o skończonej prędkości rozchodzenia się oddziaływań, by otrzymać coś podobnego do

dzisiejszego, relatywistycznego modelu.

Przyczynowa koncepcja czasu ma dość długą historię w nowożytnej filozofii. Między innymi koncepcję tę rozbudował Kant, a poddał krytyce Schopenhauer<sup>14</sup>. Prześledzenie tej historii pozostawię historykom filozofii; pora przejść do omówienia wczesnych prób analiz czasu i przyczynowości związanych z teorią względności.

### 3. OKRES INSPIRACJI FILOZOFICZNYCH

Jak wiadomo, w szczególnej teorii względności równoczesność zależy od wyboru /inercjalnego/ układu odniesienia: dwa zdarzenia równoczesne względem jednego układu odniesienia mogą nie być równoczesne względem innego układu odniesienia. Ta względność równoczesności pociąga za sobą względność następstwa czasowego zdarzeń. Niech w pewnym układzie odniesienia zdarzenie B następuje po zdarzeniu A. Można zawsze tak dobrać nowy układ odniesienia, by w nim kolejność zdarzeń A i B w czasie została odwrócona. Ale tylko pod jednym warunkiem: jeżeli zdarzenie A nie może być połączone fizycznym sygnałem /np. promieniem świetlnym/ ze zdarzeniem B. Jeżeli zdarzenia A i B mogą być połączone sygnałem fizycznym, ich kolejności w czasie nie da się odwrócić przez odpowiedni wybór układu odniesienia. Niech na przykład zdarzenie A polega na wysłaniu promieniowania świetlnego, a zdarzenie B na zaczernieniu kliszy fotograficznej przez to promieniowanie. Mamy wówczas prawo twierdzić, że A jest przyczyną B. W tym sensie szczególna teoria względności wiąże absolutne następstwo zdarzeń z przyczynowością. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że - zgodnie z postulatami tej teorii - kolejność dwóch zdarzeń w czasie nie może zostać odwrócona /przez odpowiedni dobór układu odniesienia/ tylko wówczas, gdy te dwa zdarzenia mogą być połączone sygnałem fizycznym; nie muszą one natomiast być aktualnie połączone żadnym sygnałem fizycznym. A więc, ściśle rzecz biorąc, to nie aktualny związek przyczynowy warunkuje absolutne /niezależne od wyboru układu odniesienia/ następstwo zdarzeń, lecz jedynie możliwość zachodzenia związku przyczynowego. Jak trafnie zauważa R. Torretti<sup>15</sup>, relacja, o jakiej mówi szczególna teoria względności, nie zachodzi między przyczyną i skutkiem, lecz między miejscami w czasoprzestrzeni, w których przyczyna i skutek mogą się znajdować.

Nic dziwnego, że te twierdzenia szczególnej teorii względności bardzo wczesnie ściągnęły na siebie uwagę zarówno filozofów, jak i fizyków przyzwyczajonych do nienaruszalności czasowego następstwa zdarzeń. Z filozoficznego punktu widzenia interesujące wydawało się powiązanie czasu i przyczynowości; względność równoczesności domagała się analizy logicznej /zasada niesprzeczności wydawała się zagrożona: zdarzenia mogą być i nie być równoczesne ze sobą/. Znana jest gwałtowna reakcja Bergsona na wnioski teorii Einsteina dotyczące względności czasu<sup>16</sup>. Ponieważ jednak reakcja ta polegała na niezrozumieniu teorii względności, nie będę się nią zajmować w niniejszym artykule.

Logicznej analizie sytuacji podjął się A. A. Robb już w 1914 r. w książce "A Theory of Space and Time"<sup>17</sup>. Podał on aksjomatykę /21 aksjomatów i 206 twierdzeń/, która miała na celu logicznie usystematyzować to, co szczególna teoria względności mówi na temat przestrzeni, czasu i przyczynowości. Przewodnim pojęciem dla Robba jest pojęcie "stożkowego porządku" /conic order/, inspirowanego przez dobrze znane ze szczególnej teorii względności stożki świetlne: dwa zdarzenia mogą być powiązane przyczynowo, jeżeli jedno leży wewnątrz lub na stożku świetlnym drugiego. Tak rozumiany związek przyczynowy w naturalny sposób określa czasowe następstwo obu zdarzeń<sup>18</sup>.

Problem został podjęty przez R. Carnapa<sup>19</sup>. I on zbudował system aksjomatyczny celem studiowania czasowych i przyczynowych zależności w czasoprzestrzeni szczególnej i ogólnej teorii względności. Pojęciami pierwotnymi systemu Carnapa jest relacja koincydencji zdarzeń w czasoprzestrzeni i relacja poprzedzania w czasie własnym. Niektóre definicje wprowadzone przez Carnapa przypominają definicje współczesnej struktury przyczynowej. Tak na przykład, w systemie Carnapa dwa zdarzenia są związane przyczynowo, jeśli - mówiąc dzisiejszym językiem - można je połączyć kawałkami ciągłą krzywą nieprzestrzennopodobną. Ale terminologia Carnapa jest jeszcze archaiczna /tak np. przyczynowe powiązanie zdarzeń nazywa on "substancjalnym działaniem przyczynowym"/, a jego technika definiowania, z dzisiejszego punktu widzenia, sztuczna i skomplikowana. Głównym osiągnięciem Carnapa było pokazanie, że czas można zdefiniować za pomocą relacji przyczynowych, a topologię przestrzeni za pomocą topologicznych własności czasu.

Aksjomatyczny system Carnapa nie dotyczył metrycznych własności czasoprzestrzeni.

Kolejny, może najbardziej znany, system aksjomatyczny dotyczący przestrzeni, czasu i przyczynowości w teorii Einsteina pochodzi od H. Reichenbacha<sup>20</sup>. Punktem wyjścia dla jego aksjomatyki była wersja zwanej dziś "metody radarowej" badania związków pomiędzy zdarzeniami w czasoprzestrzeni. Dla Reichenbacha zdarzenie A jest przyczyną zdarzenia B, jeżeli sygnał fizyczny może być przesłany z A do B i jeżeli mała zmiana /"zaznaczenie"/ tego sygnału w A pociąga za sobą jego małą zmianę w B. Oczywiście, sytuacja taka może być sformalizowana za pomocą odpowiednich aksjomatów /co właśnie uczynił Reichenbach/, jednakże tego rodzaju "zaznaczenie" sygnałów w matematycznej strukturze teorii względności nie wydaje się sprawą realistyczną. Filozoficzne wnioski Reichenbacha są podobne do wniosków Carnapa: porządek czasowy można wyprowadzić z porządku przyczynowego, a porządek przestrzenny z czasowego<sup>21</sup>.

Z nieco późniejszego okresu pochodzi aksjomatyka podana przez H. Mehlberga<sup>22</sup>. Autor ten umieścił swoją aksjomatykę w kontekście obszernego, interdyscyplinarnego studium poświęconego przyczynowej koncepcji czasu. Sporo miejsca Mehlberg zarezerwował na omówienie psychologicznych aspektów zagadnienia. Aksjomatyka Mehlberga dotyczy szczególnej teorii względności, ale autor ma raczej na celu dojście do wniosków filozoficznych /z których głównym jest dla niego poparcie przyczynowej koncepcji czasu/ niż analizę logicznej struktury teorii Einsteina<sup>23</sup>.

Omówione w tym paragrafie prace Robba, Carnapa, Reichenbacha i Mehlberga niewątpliwie zwróciły uwagę badaczy na związek przyczynowości i czasu w teorii względności i przyczyniły się do lepszego zrozumienia pewnych logicznych niuansów tej teorii w epoce, w której jej matematyczna struktura była znana jeszcze dosyć powierzchownie. Wszystkie te wczesne prace miały silne motywacje filozoficzne i - za wyjątkiem Robba - ich autorami byli zawodowi filozofowie. Rzecz charakterystyczna, że filozoficznym motywem, łączącym te badania była przyczynowa koncepcja czasu; teoria względności służyła raczej za model teorii, w której czas został zredukowany do przyczynowości. Wspólną techniką tych prac był zabieg aksjomatyzacji. Ich autorzy wydają się niekiedy zapominać, że może istnieć

wiele aksjomatyzacji tej samej teorii fizycznej i że w różnych aksjomatyzacjach różne pojęcia można wybierać za pierwotne. W szczególności "zredukowanie" czasu do przyczynowości za pomocą pewnej aksjomatyki dowodzi tylko tyle, że zaksjomatyzowana teoria fizyczna dopuszcza tego rodzaju redukcję, ale nie że ją zakłada. Z reguły bowiem możliwe są inne aksjomatyzacje tej samej teorii, w których ta redukcja nie zachodzi. Tego rodzaju sytuacja ma miejsce w niektórych współczesnych ujęciach aksjomatycznych, w których zagadnienie przyczynowości bezpośrednio w ogóle się nie pojawia<sup>24</sup>.

Dodajmy wreszcie, że do tradycji Carnapa, Reichenbacha i Mehlberga można zaliczyć nowsze prace Z. Augustynka<sup>25</sup>, chociaż zagadnienie przyczynowości nie jest w nich główną inspiracją filozoficzną.

#### 4. SFORMUŁOWANIE PRZYCZYNOWEJ STRUKTURY CZASOPRZESTRZENI

Rzecz bardzo znamienita, że prace omówione w poprzednim paragrafie w znikomym tylko stopniu przyczyniły się do obudzenia zainteresowań czasem i przyczynowością wśród fizyków, profesjonalnie zajmujących się teorią względności. Nowy okres pod tym względem rozpoczął się po drugiej wojnie światowej. Jednakże tym razem ożywienie badań związanych z czasem i przyczynowością nie przyszło ze strony filozofii, lecz zostało spowodowane pewnymi anomaliami przyczynowymi, jakie pojawiły się w niektórych nowo znalezionych rozwiązaniach równań Einsteina. W 1949 r. K. Gödel<sup>26</sup> znalazł rozwiązanie, w którym występują zamknięte krzywe czasopodobne. Jeżeli zdarzenia A i B leżą na takiej krzywej, nie można jednoznacznie rozstrzygnąć, które z nich jest wcześniejsze, a które późniejsze. Jeżeli ponadto np. A jest przyczyną B, to stwierdzenie, że przyczyna poprzedza skutek staje się pozbawione sensu. Wkrótce potem R. W. Bass i L. Witten<sup>27</sup> udowodnili, że każda zwarta czasoprzestrzeń musi zawierać zamknięte krzywe czasopodobne.

Trudności te dały początek nowej metodzie badania, polegającej nie na ustaleniu z góry systemu aksjomatów, lecz na dokładnej analizie globalnych własności rozwiązań równań Einsteina /nie tylko czasoprzestrzeni Minkowskiego/, a dopiero potem formułowaniu ogólnych twierdzeń popartych dowodami. W takim podejściu ważną rolę odgrywa znajdowanie kontrprzykładów pozornie oczywistych sytuacji. Czasoprzestrzenie



teorii względności obfitują w tego rodzaju kontrprzykłady. Ich nieświadomość pozwala na formułowanie systemów aksjomatycznych, z góry wykluczających wiele możliwości, jakie kryją się w matematycznej strukturze teorii względności. Uwaga ta odnosi się w całej pełni do systemów aksjomatycznych omówionych w poprzednim paragrafie. Stanowiły one bardziej czysto formalne i aprioryczne schematy niż formalizowały sytuacje, jakie rzeczywiście pojawiają się w czasoprzestrzeniach badanych przez teorię względności.

Dzięki nowemu podejściu "odkryto" strukturę przyczynową /kauzalną/ i chronologiczną teorii względności. Oczywiście punktem wyjścia musiała być czasoprzestrzeń szczególnej teorii względności, czyli czasoprzestrzeń Minkowskiego. Przełomową okazała się tu praca E. C. Zeemana z 1964 r., zatytułowana "Przyczynowość pociąga za sobą grupę Lorentza"<sup>28</sup>. Autor ten zauważył, że w czasoprzestrzeni Minkowskiego istnieje częściowy porządek na mocy relacji "zdarzenie  $x$  może wpływać na zdarzenie  $y$ " i udowodnił, że /niejednorodna/ grupa Lorentza wraz z dylatacjami /mnożeniami przez skalar/ zachowuje ten porządek. Oto komentarz Zeemana: "Znaczenie udowodnionego twierdzenia polega na tym, że jeśli zasadę przyczynowości zinterpretujemy matematycznie jako pewien częściowy porządek na czasoprzestrzeni, to /niejednorodna/ grupa Lorentza okazuje się naturalną grupą symetrii czasoprzestrzeni. Dlatego też podstawowe niezmienniki fizyki, które są reprezentacjami niejednorodnej grupy Lorentza, wynikają w naturalny sposób z samej tylko zasady przyczynowości"<sup>29</sup>.

Ale znaczenie pracy Zeemana nie polegało na bezpośredniej interpretacji, lecz na tym, że ukazując niezmienniczość względem grupy Lorentza relacji "zdarzenie  $x$  może wpływać na zdarzenie  $y$ " /i publikując ten wynik w dobrze znanym czasopiśmie fizycznym/, zwrócił on uwagę fizyków na możliwości kryjące się w tym fakcie. Wprawdzie wynik, uzyskany przez Zeemana, dotyczył tylko czasoprzestrzeni szczególnej teorii względności, ale przejście do bardziej ogólnych czasoprzestrzeni wymagało już tylko pewnej geometrycznej zręczności i było kwestią czasu.

I tak obecna postać struktury przyczynowej wyłoniła się stopniowo z prac R. Penrose'a dotyczących badań nad asymptotycznie płaskimi czasoprzestrzeniami<sup>30</sup>. Dopiero potem, gdy

poznano odpowiednio dużo faktów i prawidłowości, przyszedł czas na aksjomatyzację<sup>31</sup>. Dzięki takiej strategii aksjomatyka ta, z jednej strony zdaje sprawę z tego, co rzeczywiście zachodzi w teorii względności, z drugiej zaś - podnosi pojęcie "przestrzeni przyczynowej" /zwanej także "przestrzenią etiologiczną"/ do rangi samodzielnego przedmiotu studiów, interesującego niezależnie od formalnej struktury teorii względności<sup>32</sup>.

## 5. PRZYZYNOWA STRUKTURA CZASOPRZESTRZENI

Nie miejsce tu na bodaj skrótowe przedstawienie struktury przyczynowej czasoprzestrzeni<sup>33</sup>. Pragnę jedynie rozpatrzyć kilka podstawowych pojęć związanych z tą strukturą, które mogą rzucić nieco światła na zasadniczy temat obecnego studium i doprowadzić do interesujących wniosków.

A więc przede wszystkim właściwą sceną dla zdefiniowania relacji przyczynowych są czasoprzestrzenie czasowo orientowalne, czyli takie, w których można /w każdym punkcie/ odróżnić dwa kierunki czasu /odróżnienie to musi się zmieniać w sposób ciągły od punktu do punktu/. Nie jest rzeczą konieczną, żeby czasoprzestrzeń była aktualnie czasowo zorientowana, tzn. obojętne jest, który z dwu czasowych kierunków nazwie się przyszłością, a który przeszłością, ale musi istnieć możliwość wyboru dwu kierunków czasu. A zatem obecna postać struktury przyczynowej nie zakłada orientacji czasowej, lecz zakłada czasową orientowalność. Dawniejsze ujęcia nie kładły należytego nacisku na rozróżnienie czasowej orientowalności od czasowego zorientowania czasoprzestrzeni.

Niejako wzorcem dla wszystkich stosunków przyczynowych jest struktura przyczynowa /wektorowej/ przestrzeni Minkowskiego. Struktura ta jest dziś dobrze znana ze szczególnej teorii względności.

Jak wiadomo, w każdym punkcie dowolnej czasoprzestrzeni istnieje przestrzeń styczna, będąca /wektorową/ przestrzenią Minkowskiego. Przyczynowa struktura stycznej przestrzeni Minkowskiego przenosi się, zasadniczo nie zmieniona, na małe otoczenie punktu styczności. Otoczenie to nosi nazwę otoczenia normalnego, a odwzorowanie, które przenosi nań przyczynowe własności przestrzeni Minkowskiego, nazywa się odwzorowaniem wykładniczym /eksponencjalnym/. Tak więc każda czaso-

przestrzeń lokalnie, w dowolnym otoczeniu normalnym, posiada przyczynowe własności przestrzeni Minkowskiego. W szczególności stożki świetlne Minkowskiego także zostają zrzucone na otoczenia normalne i one to właśnie lokalnie określają strukturę przyczynową danej czasoprzestrzeni. Od razu jednak należy podkreślić, że globalnie struktura czasoprzestrzeni może różnić się drastycznie od przyczynowej struktury przestrzeni Minkowskiego.

Relacje chronologiczne i przyczynowe definiuje się w następujący sposób. Mówimy, że zdarzenie  $p$  chronologicznie poprzedza zdarzenie  $q$ , co zapisujemy  $p \ll q$ , jeżeli istnieje, skierowana w przyszłość /przypominamy: kierunek przyszłości jest dowolnie wybrany spośród dwu dopuszczalnych kierunków czasowych/ czasopodobna krzywa z  $p$  do  $q$ . Mówimy także, że  $q$  chronologicznie następuje po  $p$ . Zbiór wszystkich zdarzeń chronologicznie następujących po  $p$  nazywamy chronologiczną przyszłością zdarzenia  $p$  i oznaczamy przez  $I^+ /p/$ . Chronologiczną przeszłość zdarzenia  $p$ ,  $I^- /p/$ , definiujemy analogicznie.

Mówimy, że zdarzenie  $p$  kauzalnie poprzedza zdarzenie  $q$ , co zapisujemy  $p < q$ , jeżeli istnieje skierowana w przyszłość zerowa lub czasopodobna krzywa /czyli tzw. krzywa przyczynowa/ z  $p$  do  $q$ . Mówimy także, że  $q$  przyczynowo następuje po  $p$ . Zbiór wszystkich zdarzeń, przyczynowo następujący po  $p$ , nazywamy przyczynową przyszłością zdarzenia  $p$  i oznaczamy przez  $J^+ /p/$ . Przyczynową przeszłość zdarzenia  $p$ ,  $J^- /p/$ , definiujemy analogicznie.

W otoczeniach normalnych zbiory  $I^\pm /p/$  pokrywają się z wnętrzem stożka świetlnego zdarzenia  $p$ , a zbiory  $J^\pm /p/$  ze stożkiem świetlnym zdarzenia  $p$  i jego wnętrzem, ale w ogólnym przypadku stwierdzenia te mogą nie być prawdziwe. Zbiory  $I^\pm /p/$  zawsze są otwarte i za ich pomocą definiuje się topologię, tzw. topologię Aleksandrowa, na czasoprzestrzeni. Topologia ta jest na ogół słabsza od zwykłej topologii czasoprzestrzeni jako rozmaitości. W ogólnym przypadku zbiory  $J^\pm /p/$  nie muszą być domknięte.

Symbolika ta okazuje się bardzo wygodna w studiowaniu różnych własności czasoprzestrzeni. Na przykład: jeżeli  $p \in I^+ /p/$ , to znaczy, że w czasoprzestrzeni istnieje zamknięta krzywa czasopodobna. Tego rodzaju patologię można wykluczyć dodatkowym postulatem /który nosi nazwę warunku chrono-

logiczności/, otrzymując w ten sposób tzw. czasoprzestrzeń chronologiczną. Nie eliminuje to jednak wszelkich patologii przyczynowych, mogą bowiem jeszcze istnieć czasopodobne krzywe prawie zamknięte. Kolejne eliminowanie tego rodzaju patologii, prowadzi do hierarchii "coraz bardziej przyczynowych czasoprzestrzeni". Ich studium stanowi dziś rozbudowany dział geometrii różniczkowej i fizyki relatywistycznej<sup>34</sup>. Już choćby z tego pobieżnego szkicu widać, że wzmacnianie warunków przyczynowości prowadzi do coraz silniejszego pojęcia czasu /brak czasopodobnych krzywych zamkniętych, prawie zamkniętych.../, aż wreszcie tzw. warunek stabilnej przyczynowości /małe zaburzenie metryki nie produkuje zamkniętych krzywych czasopodobnych/ pociąga za sobą istnienie tzw. czasu kosmicznego w czasoprzestrzeni<sup>35</sup>. Związek czasu z przyczynowością w teorii względności jest więc niewątpliwy, ale roztrząsanie, czy czas redukuje się do przyczynowości, czy przeciwnie, przyczynowość do czasu, jest tu - moim zdaniem - nie na miejscu. Pierwszeństwo struktur jest bowiem rzeczą względną i to jaką strukturę wybrać za bardziej podstawową, a jaką za pochodną zależy, w dużej mierze, od gustu badacza. Zresztą nie sądzę, by w tym kontekście była to rzecz filozoficznie najważniejsza. Refleksja nad metodami współczesnej teorii czasoprzestrzeni prowadzi do bardziej interesujących wniosków.

## 6. PRZYCZYNOWOŚĆ FORMALNA I ANOMALIE PRZYCZYNOWE

Klasyczna teoria przyczynowości pochodzi od Arystotelesa. Jego rozróżnienie przyczyn formalnych, materialnych, sprawczych i celowych przez wiele stuleci przenikało całe myślenie filozoficzne. Hume'owska krytyka przyczynowości zdawała się raz na zawsze eliminować z nauki przyczynę w rozumieniu Arystotelesa. Nie trudno wszakże zauważyć, że nowoczesna metoda fizyki teoretycznej jest niczym innym jak wielkim powrotem do wyjaśniania w duchu Arystotelesowskich przyczyn formalnych. Struktury matematyczne są nie tylko językiem, służącym do opisu sytuacji i procesów fizycznych, lecz także kategorią wyjaśniającą. Zredukowanie sytuacji fizycznej do struktury matematycznej "uniesprzecznia" /by użyć języka filozofów/ tę pierwszą, przenosząc na nią racjonalność tej drugiej<sup>36</sup>.

Jeżeli tak patrzeć na przyczynowość, to istotnie można ją traktować jako bardziej pierwotną w stosunku do pojęć czasowych. Czas bowiem pojawia się dopiero na pewnym poziomie struktur matematycznych, zakładanych przez daną teorię fizyczną, podczas gdy kategoria przyczynowości /formalnej/ odpowiada istnieniu jakichkolwiek w ogóle struktur matematycznych, służących do modelowania zjawisk fizycznych. Oczywiście, w ten sposób rozumiana przyczynowość /w sensie czysto formalnym/ eliminuje problem następstwa czasowego przyczyny i skutku. Struktura matematyczna nie poprzedza czasowo, lecz logicznie, zjawiska czy klasy zjawisk, które modeluje.

Thomas Kuhn, w swoim szkicu zatytułowanym "Pojęcia przyczyny w rozwoju fizyki"<sup>37</sup>, dostrzegł rolę struktur matematycznych jako przyczyn formalnych, ale dostrzegł on również występowanie we współczesnej fizyce Arystotelesowskich przyczyn sprawczych. Wyobraźmy sobie, na przykład, że ktoś zapalił latarkę w pewnym punkcie czasoprzestrzeni, a w innym miejscu, na drodze promienia świetlnego, ustawił kliszę fotograficzną. Fizyka wyjaśnia proces rozchodzenia się fal elektromagnetycznych przez odwołanie się do pewnej struktury matematycznej, np. do równań Maxwella, ale równania Maxwella nie tłumaczą tego, że konkretny promień światła został wyemitowany w jednym punkcie czasoprzestrzeni, a w innym punkcie zaczął kliszę. Zapalenie latarki i umieszczenie w odpowiednim miejscu kliszy fotograficznej są ingerencją człowieka, a więc pewnego rodzaju anomalią w normalnym funkcjonowaniu przyrody. Takie anomalie wyjaśnia się przez odwołanie się do przyczyn sprawczych: zapalenie latarki jest przyczyną sprawczą wyemitowania promienia świetlnego, promień światła jest z kolei przyczyną sprawczą zaczernienia kliszy. Kuhn zauważa: "Raz jeszcze uderza podobieństwo do fizyki Arystotelesa: przyczyny formalne tłumaczą porządek przyrody, przyczyny sprawcze zaś - odchylenie od tego porządku"<sup>38</sup>.

Co sądzić o spostrzeżeniu Kuhna? Przede wszystkim rozróżnienie "porządku przyrody" i "odchyień od niego" /anomalii/ jest bardzo niejasne. Czy ustawienie kliszy na drodze promienia świetlnego tylko dlatego należy uznać za anomalię, że zabieg ten został zaprojektowany i wykonany przez człowieka? Z pewnością nie to Kuhn miał na myśli. Myślę, że jedynie sensowne rozróżnienie pomiędzy normalnym biegiem

przyrody a anomaliami mogłoby być następujące. Normalny bieg przyrody jest opisywany przez równania różniczkowe /np. równania Maxwella/. Równania te modelują zachowanie się praw przyrody "w ogóle", nie określając konkretnych warunków, w jakich prawa aktualnie działają. Warunki te można "zadać" przez odpowiedni wybór warunków brzegowych dla danych równań różniczkowych. W ten sposób przez warunki brzegowe można wymodelować konkretny proces rozchodzenia się fali elektromagnetycznej i jej częściowego pochłonięcia przez emulsję kliszy. To, co opisują równania różniczkowe, można by nazwać "normalnym funkcjonowaniem przyrody", a to, co modeluje się za pomocą odpowiednich warunków brzegowych, - "anomalią". Ale w takim ujęciu anomalie także są wyjaśniane przez struktury matematyczne, czyli przez Arystotelesowskie przyczyny formalne. Oczywiście można dla tego rodzaju wyjaśniania anomalii zarezerwować nazwę "przyczyna sprawcza" i nazwa taka byłaby do pewnego stopnia uzasadniona, ale nie sądzę, by kryła się w tym jakaś głębsza filozofia.

A struktura przyczynowa teorii względności jest niczym innym jak dodatkową strukturą matematyczną, modelującą rozchodzenie się "sprawczych anomalii" w czasoprzestrzeni. Mówiąc nieco ściślej: struktura przyczynowa rekonstruuje wszystkie możliwe kanały, którymi mogą rozchodzić się w czasoprzestrzeni sygnały, zdolne przenosić oddziaływania pomiędzy zdarzeniami. Przyczynowość sprawczą rozumianą po Arystotelesowsku można odnieść do struktury przyczynowej czasoprzestrzeni za pomocą następujących stwierdzeń: /1/ jeżeli przyczyna sprawcza znajduje się w miejscu  $p$ , to może ona wywołać skutek w miejscu  $q$  tylko wtedy, gdy  $q \in J^+/p/$ ; /2/ jeżeli skutek znajduje się w miejscu  $r$ , to jego przyczyna sprawcza musi znajdować się w miejscu  $s$  takim, że  $s \in J^-/r/$ . A zatem struktura przyczynowa nie tyle mówi o samej przyczynowości sprawczej ile raczej o kanałach, którymi mogą rozchodzić się "zaburzenia sprawcze". I czyni to oczywiście w sposób czysto formalny.

Współczesna fizyka nigdy nie zdradza swojego formalnego charakteru. Rozumienie świata przez teorie fizyczne jest zawsze rozumieniem strukturalnym.

PRZYPISY

- 1 Por. jego Traktat o naturze ludzkiej. Warszawa 1963. Biblioteka Klasyków Filozofii.
- 2 Language, Truth and Logic. Penguin Books 1975 s. 73.
- 3 O przyczynowości - Miejsce zasady przyczynowej we współczesnej nauce. Warszawa 1968 s. 60.
- 4 Por. np. B u n g e, jw.; B. J. G a w e c k i. Zagadnienie przyczynowości w fizyce. Warszawa 1969; H. M e h l b e r g. Time, Causality, and the Quantum Theory. Vol 1: Essay on the Causal Theory of Time. Reidel. Dordrecht-Boston-London 1980.
- 5 G. F. L e i b n i z. Wyznanie wiary filozofa... oraz inne pisma filozoficzne. Warszawa 1969 s. 336. Biblioteka Klasyków Filozofii.
- 6 Pisałem obszerniej na ten temat z A. Staruszkiewiczem w artykule: A Physicist's View on the Polemics between Leibniz and Clarke /"Organon" 11:1975 s. 205-213/ oraz z D. J. Raine'm w książce: The Science of Space - Time /Pachart. Tucson 1981/.
- 7 M e h l b e r g, jw. s. 42-50. Niniejszy paragraf jest w znacznej mierze oparty na tym studium.
- 8 Trzecie pismo Leibniza do Clarke'a s. 337.
- 9 Initia rerum mathematicarum metaphysica. W: G. W. L e i b n i z. Philosophical Papers and Letters. Ed. L. E. Loemker. Reidel. Dordrecht 1969 s. 666-674.
- 10 Por. M e h l b e r g, jw. s. 42.
- 11 G. W. L e i b n i z. Hauptschriften zur Grundlegung der Philosophie. Ed. E. Cassirer. Meiner. Hamburg 1966 vol 2 s. 557.
- 12 Wyznanie wiary filozofa s. 88.
- 13 Jw. s. 46-48.
- 14 Por. M e h l b e r g, jw. s. 50-69.
- 15 Relativity and Geometry. Pergamon Press Oxford. New York 1983 s. 123.
- 16 Reakcja ta znajduje się w książce Bergsona "Durée et simultaneité" opublikowanej w 1922 r. M. in. z filozoficznego punktu widzenia przeciw Bergsonowi zaprotestował A. Metz, a z fizycznego Becquerel. Bergson nie przyjął tej krytyki, czemu dał wyraz w uzupełnieniach do drugiego wydania swojej książki z 1923 r. Por. na ten temat: M. A. T o n n e l a t. Histoire du principe de relativité. Flammarion. Paris 1971 s. 280-293; M. C a p e k. Bergson and Modern Physics. Reidel. Dordrecht 1971 s. 238-256.
- 17 Cambridge University Press. Zrewidowana wersja tej książki ukazała się w 1936 r. w tym samym wydawnictwie.
- 18 Uwagi na temat aksjomatyki Robba por. M e h l b e r g, jw. s. 91-95; T o r r e t t i, jw. s. 123.
- 19 "Über die Abhängigkeit der Eigenschaften des Raumes von denen der Zeit. "Kant - Studien" 30:1925 s. 331-345; por. M e h l b e r g, jw. s. 95-98.
- 20 Axiomatik der relativistischen Raum - Zeit - Lehre.

Vieweg. Braunschweig 1922.

<sup>21</sup> Obszerniej o poglądach Reichenbacha por.: Mehlberg, jw. s. 105-133; Torretti, jw. s. 222-226.

<sup>22</sup> Essai sur la theorie causale du temps. I: La theorie causale du temps dans ses principaux representants. "Stud. Phil." /Lemberg/ 1:1935 s. 119-260; II: Duree et causalite. Tamże 2:1937 s. 111-231. Aksjomatyka, o której mowa, jest zawarta w drugiej części. Aksjomatyka ta została zmodernizowana w pierwszym tomie powojennego angielskiego wydania dzieł Mehlberga: Time, Causality, and the Quantum Theory /Vol. 1: Essay on the Causal Theory of Time; Vol. 2: Time in Quantized Universe. Reidel. Dordrecht-Boston-London 1980/.

<sup>23</sup> Pewne uwagi krytyczne na temat pracy Mehlberga por.: Torretti, jw. s. 123.

<sup>24</sup> Por. np. aksjomatykę szczególnej teorii względności podaną przez J. W. Schutza /Foundations of Special Relativity: Kinematic Axioms for Minkowski Space - Time /Lecture Notes in Physics/. Springer. Berlin-Heidelberg-New York 1973/ oraz aksjomatykę ogólnej teorii względności przez J. Ehlersa, F. A. E. Piraniego i A. Schilda /The Geometry of Free Fall and Light Propagation. W: General Relativity - Papers in Honour of J. L. Synge. Ed.: L. O'Riifeartaigh. Clarendon Press. Oxford 1972 s. 63-84/. Por. także mój art.: Space - Time Structures. "Acta Cosmologica" 6:1977 s. 109-128.

<sup>25</sup> Por. jego książki: Natura czasu. Warszawa 1975; Przeszłość, teraźniejszość, przyszłość. Warszawa 1979.

<sup>26</sup> An Example of a New Type of Cosmological Solution of Einstein's Field Equations of Gravitation. "Reviews of Modern Physics" 21:1949 s. 447-450.

<sup>27</sup> Remark on Cosmological Models. "Reviews of Modern Physics" 29:1957 s. 452-453.

<sup>28</sup> Causality Implies the Lorentz Group. "Journal of Mathematical Physics" 5:1964 s. 480-493.

<sup>29</sup> Tamże.

<sup>30</sup> Asymptotic Properties of Fields and Space - Times. "Physics Reviews Lett." 10:1963 s. 66-68; Conformal Treatment of Infinity. W: Relativity, Groups and Topology. Ed. C. DeWitt. Gordon and Breach. New York 1964 s. 565-586; Zero Rest Mass Fields Including Gravitation: Asymptotic Behavior. "Proceedings of the Royal Society London" A. 284:1965 s. 159-203.

<sup>31</sup> E. H. Kronheimer, R. Penrose. On the Structure of Causal Spaces. "Proc. Camb. Philos. Soc." 63:1967 s. 481-501; B. Carter. Causal Structure in Space - Time. W: General Relativity and Gravitation. Vol 1. New York-London 1971 s. 349-391 /aksjomatyka przestrzeni przyczynowych jest podana w § 12 tej pracy/.

<sup>32</sup> Uwagi na temat prac, które doprowadziły do sformułowania struktury przyczynowej czasoprzestrzeni można znaleźć w § 3.2 pracy: F. J. Tipler, C. J. S. Clarke, G. F. R. Ellis. Singularities and Horizons - A Review Article. W: General Relativity and Gravitation. Ed. A. Held. Vol. 2. Plenum. New York-London 1980 s. 97-206.

<sup>33</sup> Poglądowe przedstawienie tej struktury można znaleźć na przykład, w następujących pracach: R. Gerlach.



Space - Time Structure from a Global Viewpoint. W: General Relativity and Cosmology. Enrico Fermi XLVII Course. Academic Press. New York s. 71-103; R. G e r o c h, G. T. H o - r o w i t z. Global Structure of Space - Time. W: General Relativity - An Einstein Centenary Survey. Eds. S. W. Hawking, W. Israel. Cambridge University Press. Cambridge 1979 s. 212-293, 859-860.

34 Por. dwie fundamentalne monografie: S. W. H a w - h i n g, G. F. R. E l l i s. The Large Scale Structure of Space - Time. Cambridge University Press 1973; J. K. B e e m, P. E. E h r l i c h. Global Lorentzian Geometry. M. Dekker. New York-Basel 1981.

35 Por. mój art. Global Time Problem in Relativistic Cosmology. "Annales de la Societe Scientifique de Bruxelles" 89:1975 s. 522-532.

36 Obszerniej na temat pisałem w art.: Matematyka i wyobrażenia w teorii grawitacji /w druku/.

37 Jest to drugi rozdział jego książki "Dwa bieguny". Warszawa 1985 s. 53-66.

38 Tamże s. 61.

#### TIME AND CAUSALITY IN GENERAL RELATIVITY

##### S u m m a r y

The so-called chronological and causal structure of space-time is discussed within the conceptual framework of general relativity. Leibniz with his causal theory of time could be regarded as a forerunner of the present views on time and causality inspired by Einstein's theory. In Leibniz's opinion, time is of a relational character, and relations in question can be reduced to the "order of causality". In the early relativistic period many authors attempted at clarifying this problem by constructing various axiomatizations of the theory of relativity. Such axiomatizations proposed by Robb, Carnap, Reichenbach and Mehlberg are briefly presented. A new line of research emerged out of global analyses of particular solutions to Einstein's equations /the Godel solution played here an important role/. It turned out that previous axiomatizations a priori eliminated many interesting situations. These studies led to the formulation of the present chronological and causal structures of space-time. It is argued that they can be consistently interpreted in the spirit of the structuralistic view.