

Eugeniusz Żabski

Próba aksjomatycznego ujęcia przyczynowości relatywistycznej

Zagadnienie przyczynowości jest jednym z najważniejszych problemów naukowych. W historii myśli ludzkiej bywało ono różnie pojmowane.

W pracy [Łukasiewicz, 1961], po analizie różnych związków przyczynowo-skutkowych, jej autor podaje cechy jakie — jego zdaniem — przysługują tym związkom. Otóż, „Pierwszą [...] właściwością pojęcia przyczyny jest cecha [...]: przedmiot, którego zachodzenie pociąga za sobą z koniecznością zachodzenie jakiegoś innego przedmiotu, to znaczy skutku. Z cechy tej wynika bezpośrednio [...] cecha: przedmiot, którego niezachodzenie wywołane jest z koniecznością przez niezachodzenie skutku.

Drugą [...] właściwością pojęcia przyczyny niezależną od pierwszej jest cecha [...]: przedmiot, którego zachodzenie nie jest wywołane z koniecznością przez zachodzenie skutku. Z cechy tej bezpośrednio wynika [...] cecha: przedmiot, którego niezachodzenie nie wywołuje z koniecznością niezachodzenia skutku.

Z kombinacji obu tych cech [...] wynikają dwie dalsze [...] własności pojęcia przyczyny: przedmiot pozostający do skutku w stosunku nieodwracalnym i przechodnim”.

Łukasiewicz podaje dalej następującą definicję przyczyny (skutku): „Przyczyna jest przedmiotem rzeczywistym, wywołującym z koniecznością jakiś inny przedmiot rzeczywisty, ale nie wywołanym przezeń w sposób konieczny”. Skutek zaś jest „przedmiotem rzeczywistym, wywołanym z koniecznością przez jakiś inny przedmiot rzeczywisty, ale nie wywołującym go w sposób konieczny” (s. 52).

Zauważmy, że «przedmiot» w fizyce jest czymś innym, niż «przedmiot» w chemii. Te z kolei «przedmioty» są czymś jeszcze innym, niż «przedmioty» w biologii. A od tych wszystkich «przedmiotów» różne są «przedmioty» w psychologii, czy naukach społecznych. Termin „przyczyna” w różnych kontekstach (w szczególności

w różnych dyscyplinach naukowych) jest zatem rozumiany nieco inaczej. Nieco inaczej pojmowana jest więc np. przyczynowość w biologii, a inaczej w fizyce, inaczej w historii, a jeszcze inaczej na co dzień. Należy zatem pogodzić się z myślą, że nie uda się podać takiej definicji przyczyny, którą można by stosować we wszystkich tych dziedzinach. Należy, przeciwnie, wybrać jedną z tych dziedzin, zastanowić się jak rozumiana jest przyczyna w owej dziedzinie i podać definicję owej relacji dostosowaną do tej tylko dziedziny.

Spróbujemy podać definicję przyczynowości relatywistycznej, a więc przyczynowości ujmowanej w fizyce współczesnej (dokładniej: w teorii kwantów). Precyzując pojęcie relacji przyczynowości relatywistycznej musimy zatem uwzględnić to wszystko, co przyjmowane jest w fizyce współczesnej i ma wpływ na rozumienie owej relacji. I tak: w fizyce współczesnej zakłada się, po pierwsze, że przyczyny i skutki są przedmiotami tego samego rodzaju. Zauważmy przy okazji, że w innych dziedzinach nauki tego założenia nie przyjmuje się. Przyczyny i skutki w innych dziedzinach nauki mogą być zatem «przedmiotami» różnego rodzaju. Dowodzą tego rozpatrywane przez Łukasiewicza następujące przykłady: uderzenie sztyltem w serce jakiegoś człowieka, będące przyczyną jego śmierci, jest czymś różnym od skutku. Także wojna lub zaburzenia polityczne, będące przyczynami spadania wartości akcji na giełdzie, są zjawiskami różnymi od skutku. W fizyce zakłada się, po drugie, że relacja przyczynowości zachodzi między zdarzeniami. Niestety termin „zdarzenie” w fizyce rozumiany jest rozmaicie. My termin ten będziemy rozumieć tak, jak rozumie się go w pracy [Krajewski, 1967]. Otóż, na str. 181 tej książki, przez „zdarzenie” rozumie się uzyskanie albo wydatkowanie energii przez jakieś ciało. Przyczyną jest dostarczenie energii przez ciało A, a skutkiem — jej uzyskanie przez ciało B. Związek przyczynowy polega zatem — zdaniem Krajewskiego — na jednostronnym przekazaniu energii ciała A różnemu od niego ciało B. Zauważmy, że z jednostronnego charakteru tej zależności wynika asymetria stosunku przyczynowości, a także jego przeciwzwrotność i przechodność. Zauważmy też, że ciało A przekazuje energię ciało B w czasie i w przestrzeni. Zatem związek przyczynowy może zachodzić między zdarzeniami rozdzielonymi w czasie i przestrzeni. W mechanice klasycznej zakładało się *implicite*, że taki przekaz energii (oddziaływanie) rozchodzi się w przestrzeni z prędkością nieskończoną. W szczególnej teorii względności — jak wiadomo — przyjmuje się tezę o istnieniu maksymalnej prędkości przekazywania energii. Konsekwencją tej tezy jest twierdzenie, iż zachodzenie relacji przyczynowości w przyrodzie nie jest natychmiastowe. Skoro bowiem istnieje graniczna prędkość przekazu energii, istnieje także graniczna prędkość rozchodzenia się związku przyczynowo-skutkowego.

Zgodnie ze szczególną teorią względności, jeżeli jakieś zdarzenie działa na inne, to pierwsze jest absolutnie wcześniejsze od drugiego. Ponieważ związki kauzalne na gruncie fizyki relatywistycznej utożsamia się z oddziaływaniami, to dwa zdarzenia są powiązane kauzalnie, gdy jedno z nich jest absolutnie wcześniejsze od drugiego. Znaczy to, że między dwoma zdarzeniami zachodzi stosunek przyczynowo-skutkowy, gdy we wszystkich układach odniesienia przyczyna poprzedza skutek.

Owa absolutna wcześniejszość przyczyny w stosunku do skutku jest bardzo ważną własnością relacji przyczynowości, którą posługuje się fizyk współczesny. Na własność tę szczególną uwagę zwraca się np. w pracy [Augustynek, 1956]. Na str. 175 autor pisze:

Po pierwsze dla związku przyczynowego charakterystyczne jest nie następstwo czasowe w ogóle, [...] ale absolutne następstwo czasowe [...].

Po drugie, jak wynika z teorii względności, absolutne następstwo zdarzeń nie oznacza jeszcze istnienia więzi przyczynowej między nimi — mówi się bowiem w tym wypadku tylko o możliwości zachodzenia takiej więzi. Związek przyczynowy implikuje absolutne następstwo zdarzeń, ale nie odwrotnie.

Zauważmy, że zdaniem niektórych filozofów, poprzedzanie przyczyny względem skutku nie jest istotną własnością związku przyczynowego. Sądzą bowiem, że przyczyna może czasem być równoczesna ze skutkiem, a nawet następować po nim. Np. Ingarden w *Sporze o istnieniu świata* głosił pogląd, że przyczyna jest równoczesna ze skutkiem, zaś Łukasiewicz nie wykluczał także tego, że przyczyna może być późniejsza od skutku.

Mówiąc o przyczynowości często wspomina się o tzw. ZASADZIE PRZYCZYNOWOŚCI. Zwykle formuluje się ją następująco: Każde zdarzenie ma jakąś przyczynę. Wydaje się, że wszyscy fizycy akceptują tę zasadę.

W fizyce mówi się także często o «konieczności» związku przyczynowego. Rozumie się ją, jak się zdaje, tak, że dla każdego zdarzenia z_1 potrafimy wskazać takie zdarzenie z_2 , iż ze zdarzenia z_2 «wynika», na mocy jakiegoś prawa fizyki, zdarzenie z_1 . Istotnie, dla wielu zdarzeń z_1 potrafimy wskazać takie zdarzenie z_2 , z którego zdarzenie z_1 «wynika»; zdarzenie z_1 jest zatem, w powyższym sensie, konieczne. Ale czy każde zdarzenie jest w tym sensie konieczne? Na pytanie to odpowiemy słowami Heisenberga zawartymi w [Heisenberg, 1965]:

Rozpatrzmy pewien przykład. Atom radu może emitować cząstkę α . Nie jesteśmy w stanie przewidzieć w jakiej chwili nastąpi emisja. Powiedzieć można tylko tyle, że akt emisji zachodzi przeciętnie w ciągu dwóch tysięcy lat. Toteż obserwując zjawisko emisji, fizycy *de facto* nie próbują odpowiedzieć na pytanie, z jakiego poprzedniego zdarzenia musi wynikać akt emisji.

Dlaczego? Zdaniem Heisenberga możliwe są dwie odpowiedzi na to pytanie.

Po pierwsze można powiedzieć, że dane doświadczenia przekonały nas, że prawa teorii kwantów są słuszne, jeśli zaś uważamy je za słuszne, to powinno być dla nas rzeczą jasną, że akt emisji nie wynika w sposób konieczny z żadnego poprzedniego zdarzenia. Po drugie, można powiedzieć, że z grubsza wiemy, co spowodowało akt emisji, ale nie wiemy dokładnie z jakiego poprzedniego zdarzenia wynika on z koniecznością” (s. 80).

Zatem konieczność nie jest własnością relacji przyczynowości relatywistycznej, nie przysługuje ona tej zależności w każdym wypadku. Wszystkie pozostałe założenia lub ustalenia, o których wspomnieliśmy powyżej, a które przyjmuje się w fizyce

współczesnej, nie mogą być pominięte w definicjach przyczynowości relatywistycznej. Definicje te zapiszemy w sformalizowanym języku JC, który teraz przedstawimy.

Alfabet języka JC zawiera:

a) stałe logiczne, tj. funktory rachunku zdań ($\sim, \vee, \wedge, \rightarrow, \equiv$), kwantyfikatory (\wedge, \vee), znak identyczności (\equiv) oraz nawiasy i przecinki,

b) stałą specyficzną języka JC: c , tj. symbol relacji przyczynowości relatywistycznej,

c) stałe specyficzne języka teorii czasu relatywistycznego JCZ, tj. znaki funkcji: t, f , gdzie t przyporządkowuje momentom liczby rzeczywiste, zaś f — zdarzeniom momenty w odpowiednich układach odniesienia,

d) zmienne reprezentujące: momenty czasu — m_1, m_2, \dots ; układy odniesienia — u, u_1, u_2, \dots ; zdarzenia fizyczne — z, z_1, z_2, \dots ; liczby rzeczywiste — x, x_1, x_2, \dots

e) stałą języka elementarnej teorii liczb rzeczywistych: $<$, tj. symbol relacji mniejszości.

Zbiór termów TM jest to najmniejszy zbiór wyrażeń, do którego należą wszystkie zmienne reprezentujące momenty oraz wyrażenia postaci: $f(z, u)$.

Zbiór termów arytmetycznych TA jest to najmniejszy zbiór wyrażeń, do którego należą wszystkie zmienne reprezentujące liczby rzeczywiste oraz wyrażenia postaci: $t(m, u)$, bądź $t(f(z, u), u)$.

Termy t_1 i t_2 nazywamy termami tego samego rodzaju, gdy spełniony jest jeden z następujących dwóch warunków:

1) zarówno t_1 , jak i t_2 są termami ze zbioru TM lub

2) t_1 i t_2 są termami ze zbioru TA.

Niech a_1 i a_2 będą dowolnymi termami arytmetycznymi, zaś t_1 i t_2 — termami tego samego rodzaju.

Formułami atomowymi języka JC są wyrażenia postaci: $a_1 < a_2, t_1 = t_2, z_1 c z_2$. To ostatnie wyrażenie czytamy: zdarzenie z_1 jest przyczyną zdarzenia z_2 .

Niech z będzie metajęzykową zmienną reprezentującą zmienne języka JC, tj. zmienną przebiegającą zmienne reprezentujące momenty czasu, bądź układy odniesienia, bądź zdarzenia, bądź liczby rzeczywiste.

Język JC jest to najmniejszy zbiór wyrażeń o następujących własnościach:

a) wszystkie formuły atomowe języka JC należą do tego języka,

b) jeśli A należy do języka JC, to $\sim(A), \wedge z(A)$ i $\vee z(A)$ należą do tego języka,

c) jeśli A oraz B należą do języka JC, to $A \vee B, A \wedge B, A \rightarrow B, A \equiv B$ należą także do tego języka.

Oprócz stałych tworzących alfabet języka JC, tzn. stałych logicznych, stałej specyficznej języka JC, stałej c , stałych specyficznych języka JCZ, używać będziemy stałych zdefiniowanych za pomocą stałych tworzących alfabet języka JC.

Do owych stałych zdefiniowanych należą symbole: \neq, W, R , określone przez następujące definicje:

D1. $t_1 \neq t_2 \equiv \sim (t_1 = t_2)$, gdzie t_1 i t_2 są termami tego samego rodzaju,

D2. $W(z_1, z_2, u) \equiv t(f(z_1, u)) < t(f(z_2, u))$,

D3. $R(z_1, z_2, u) \equiv W(z_1, z_2, u) \wedge W(z_2, z_1, u)$.

D1 jest dobrze znanym schematem definicji nieidentyczności (różności). Definiendum definicji D2 i D3 odpowiednio czytamy:

W układzie u zdarzenie z_1 jest wcześniejsze od zdarzenia z_2 ,

W układzie u zdarzenia z_1 i z_2 są równoczesne.

Alfabet języka JC wzbogacamy o symbole: \neq , W, R, natomiast zbiór formuł atomowych języka JC — o wyrażenia postaci: $t_1 = t_2$, $W(z_1, z_2, u)$, $R(z_1, z_2, u)$.

System C jest teorią opartą na aksjomatach:

a) elementarnej teorii mniejszości. Aksjomatyka ta przedstawiona jest np. w pracy [Mostowski, 1948],

b) definicjach D1—D3,

c) aksjomatach teorii czasu relatywistycznego CZ,

CZ1. $\forall z \forall u \forall m f(z, u) = m$,

CZ2. $\forall u \forall m \forall x t(m, u) = x$,

CZ3. $\forall u \forall x \forall m t(m, u) = x$,

CZ4. $\forall z \forall m_1 \forall m_2 [m_1 \neq m_2 \rightarrow t(m_1, u) \neq t(m_2, u)]$,

CZ5. $\forall z_1 \forall z_2 \forall u W(z_1, z_2, u)$,

CZ6. $\forall z_1 \forall z_2 \forall u_1 \forall u_2 \forall u_3 [W(z_1, z_2, u_1) \wedge W(z_2, z_1, u_2) \wedge R(z_1, z_2, u_3)]$.

CZ jest pewną modyfikacją teorii czasu relatywistycznego omówionej dokładnie w [Żabski, 1985].

Aksjomat CZ1 charakteryzuje dwuargumentową funkcję f , której argumentami są zdarzenia i układy, a wartościami momenty. Aksjomat CZ1 stwierdza, że w każdym układzie dla każdego zdarzenia istnieje dokładnie jeden moment, w którym zdarzenie to zachodzi. Inaczej: każdemu zdarzeniu w każdym układzie odniesienia funkcja f przyporządkowuje moment, w którym owo zdarzenie zachodzi w tym układzie. Wyrażenie: $f(z, u) = m$ można więc czytać: zdarzenie z w układzie u zachodzi w momencie m .

Aksjomaty CZ2—CZ4 charakteryzują dwuargumentową funkcję t , której argumentami są momenty i układy odniesienia, a wartościami — liczby rzeczywiste. Aksjomat CZ2 stwierdza, że czas w każdym układzie jest ciągły i jednowymiarowy, tzn. że w każdym układzie odniesienia, każdemu momentowi przyporządkowana jest jedna i tylko jedna liczba rzeczywista. Aksjomat CZ3 orzeka, że w każdym układzie funkcja t przekształca zbiór wszystkich momentów na zbiór wszystkich liczb rzeczywistych, tzn. w każdym układzie odniesienia, każda liczba rzeczywista jest przyporządkowana pewnemu momentowi. Aksjomat CZ4 stwierdza, że w każdym układzie odniesienia funkcja t jest różnowartościowa, tzn. w każdym układzie różnym momentom funkcja ta przyporządkowuje różne liczby rzeczywiste.

Aksjomaty CZ5 i CZ6 charakteryzują relację wcześniejszości, Aksjomat CZ5 orzeka, że istnieją co najmniej dwa takie zdarzenia, że jedno z nich jest bezwzględnie wcześniejsze od drugiego, tzn. iż jedno z nich jest wcześniejsze od drugiego w każdym układzie odniesienia. Aksjomat CZ6 stwierdza zaś, że relacje wcześniejszości i równoczesności są względne, zrelatywizowane do układów odniesienia, tzn., że ist-

nieją takie układy u_1 , u_2 i u_3 oraz zdarzenia z_1 i z_2 , że w układzie u_1 zdarzenie z_1 jest wcześniejsze od zdarzenia z_2 , w układzie u_2 , na odwrót, zdarzenie z_2 jest wcześniejsze od zdarzenia z_1 , natomiast w układzie u_3 oba te zdarzenia są równoczesne. Aksjomatami systemu C są ponadto aksjomaty specyficzne, charakteryzujące relację przyczynowości relatywistycznej:

- C1. $\Lambda z_1 \Lambda z_2 (z_1 c z_2 \rightarrow \sim(z_2 c z_1))$,
 C2. $\Lambda z_1 \Lambda z_2 \Lambda z_3 (z_1 c z_2 \wedge z_2 c z_3 \rightarrow z_1 c z_3)$,
 C3. $\Lambda z_1 \Lambda z_2 (z_1 c z_2 \rightarrow \Lambda u (W(z_1, z_2, u)))$,
 C4. $\Lambda z_2 \forall z_1 (z_1 c z_2)$.

Aksjomaty C1 i C2 orzekają odpowiednio, że relacja przyczynowości relatywistycznej jest przeciwsymetryczna i przechodnia. Oba te aksjomaty łącznie stwierdzają, że relacja ta częściowo porządkuje zbiór wszystkich zdarzeń. Aksjomat C3 stwierdza z kolei, że przyczynowość relatywistyczna jest podrelacją relacji wcześniejszości absolutnej. Inaczej: aksjomat ten podaje warunek konieczny relacji przyczynowości relatywistycznej, którym jest zachodzenie relacji wcześniejszości absolutnej przyczyny względem skutku, Aksjomat C4 wreszcie jest zasadą przyczynowości zapisaną w sformalizowanym języku JC. Zauważmy jednakże, że aksjomat ten nie stwierdza, że wszystko ma swoją przyczynę (jak się niekiedy formułuje zasadę przyczynowości) tylko, że każde zdarzenie ma swoją przyczynę.

Prawdziwy też wydaje się następujący aksjomat:

- C5. $\Lambda z_1 \forall z_2 (z_1 \subset z_2)$.

Aksjomat ten stwierdza, iż każde zdarzenie jest przyczyną co najmniej jednego zdarzenia. C4 i C5 zatem stwierdzają łącznie, że nie ma zdarzeń bezprzyczynowych i bezskutkowych.

System C oparty jest na klasycznym rachunku kwantyfikatorów z identycznością i funkcjami. Stąd reguły dowodzenia, jakie przyjmuje się w tym systemie, są regułami dowodzenia klasycznego rachunku kwantyfikatorów z identycznością i funkcjami.

Twierdzeniami systemu C są m.in. następujące dwa wyrażenia:

- T1. $\Lambda z \sim(zcz)$
 T2. $\Lambda z_1 \Lambda z_2 \forall u \{[W(z_2, z_1, u) \vee R(z_2, z_1, u)] \rightarrow \sim(z_1 c z_2)\}$.

Dowód T1. Z aksjomatu C1 wynika: $zcz \rightarrow \sim(zcz)$. Stąd i z tezy ($zcz \rightarrow (zcz) \rightarrow \sim(zcz)$), stosując regułę odrywania i dołączania dużego kwantyfikatora otrzymujemy T1.

Dowód T2. Z aksjomatu C3 przez transpozycję otrzymujemy: $\sim \Lambda u [W(z_1, z_2, u) \rightarrow \sim(z_1 c z_2)]$. Stąd i twierdzenia teorii CZ: $W(z_1, z_2, u) \equiv \sim[W(z_2, z_1, u) \vee R(z_2, z_1, u)]$ otrzymujemy: $\sim \Lambda u \sim[W(z_2, z_1, u) \vee R(z_2, z_1, u)] \rightarrow \sim(z_1 c z_2)$. Stąd wynika już T2.

Twierdzenie T1 orzeka, że żadne zdarzenie nie jest swoją przyczyną. Stwierdza ono zatem, że przyczynowość relatywistyczna jest relacją przeciwwrotną. Twierdzenie T2 orzeka, że jeśli w pewnym układzie zdarzenie z_2 jest wcześniejsze od zdarzenia z_1 lub że są one równoczesne, to zdarzenie z_1 nie jest przyczyną zdarzenia z_2 . Podaje ono więc warunek wystarczający niezachodzenia relacji przyczynowości relatywistycznej.

Mamy nadzieję, że powyższe ustalenia mogą być pomocne w budowie sformalizowanej teorii przyczynowości relatywistycznej, która w pełni zadowoliłaby fizyków. Zdajemy sobie bowiem sprawę z tego, że system C jest tylko pierwszym krokiem w tym kierunku.

Łatwo zauważyć, że rozumienie przyczynowości relatywistycznej zależy w dużej mierze od zakładanej teorii czasu. W teorii CZ łatwo udowodnić, że czas jest nieskończony, tzn. że w każdym układzie, dla każdego momentu istnieje zawsze moment późniejszy (wcześniejszy). Inaczej: czas dowolnego układu nie ma końca, tj. momentu najpóźniejszego, i nie ma początku, tj. momentu najwcześniejszego.

Jak wiadomo, pewne dane fizyczne pozwalają na przyjęcie hipotezy tzw. czasu półprostej, tzn. czasu z momentem początkowym, ale bez momentu końcowego. Hipoteza ta, wobec nowszych danych kosmologii i astrofizyki, wydaje się bardzo prawdopodobna. Uwaga ta uzasadnia budowę systemu CZ^+ , który sformułowany jest także w języku JCZ z tym, że zmienne x, x_1, x_2, \dots , reprezentują nie, jak w systemie CZ, liczby rzeczywiste, lecz tylko liczby rzeczywiste nieujemne. Aksjomatyka systemu CZ^+ jest identyczna z aksjomatyką teorii CZ, oba te systemy różnią się jedynie interpretacją zmiennych x, x_1, x_2, \dots .

W teorii CZ^+ nie można już — jak w teorii CZ — udowodnić, że czas jest nieskończony. Można natomiast wykazać, że w każdym układzie istnieje moment późniejszy oraz że w każdym układzie istnieje moment najwcześniejszy, tzn. że czas każdego układu ma początek, ale nie ma końca.

Przyjmijmy, że budując sformalizowaną teorię przyczynowości założyliśmy system CZ. Tak zbudowana teoria C wydaje się być niesprzeczna. Gdybyśmy jednak, zamiast systemu CZ, założyli teorię czasu CZ^+ , tak zbudowana teoria przyczynowości, nazwijmy ją C^+ — byłaby sprzeczna. Z aksjomatyką systemu CZ^+ byłby mianowicie sprzeczny aksjomat C4. Budując zatem teorię przyczynowości C^+ nad teorią czasu CZ^+ , należy odrzucić zasadę przyczynowości i w jej miejsce przyjąć następujący aksjomat: C^+4 . $\forall z_1 \wedge z_2 (z_1 \neq z_2 \rightarrow z_1 cz_2)$.

Aksjomat C^+4 stwierdza istnienie zdarzenia z_1 będącego przyczyną każdego innego, różnego od owego z_1 , zdarzenia z_2 . Owo zdarzenie z_1 nazywamy pierwszą przyczyną. Aksjomat ten orzeka zatem istnienie pierwszej przyczyny. Można by go więc nazwać aksjomatem istnienia pierwszej przyczyny. Tę pierwszą przyczynę rozumiemy jako zdarzenie, które w kosmologii nosi zwykle nazwę Wielkiego Wybuchu. Jest to i początek czasu, i praprzyczyna wszelkich innych zdarzeń.

Z aksjomatu C^+4 wynika następujące twierdzenie: $\forall z_2 \wedge z_1 (z_1 \neq z_2 \rightarrow z_1 cz_2)$. Twierdzenie to orzeka, że każde zdarzenie (z wyjątkiem pierwszej przyczyny) ma przyczynę. Twierdzenie to nazywamy zasadą *quasi-przyczynowości*.

BIBLIOGRAFIA

- Augustynek, Z. (1956): „Szczególna teoria względności a przyczynowość”, *Mysł Filozoficzna* nr 1(21), s. 164—175.
- Heisenberg, W. (1965): *Fizyka a filozofia*, Warszawa.
- Krajewski, W. (1967): *Związek przyczynowy*, Warszawa.
- Łukasiewicz, J. (1961): „Analiza i konstrukcja przyczyny” [w:] J. Słupecki (red.), *Z zagadnień logiki i filozofii*, Warszawa, s. 9—62.
- Mostowski, A. (1948): *Logika matematyczna*, Warszawa—Wrocław.
- Żabski, E. (1985): „Formalizacja pewnej teorii czasu zawartej w szczególnej teorii względności”, *Poznańskie Studia z Filozofii Nauki*, z. 9, s. 213—241.