

Mariana Smoluchowskiego ujęcie zasady przyczynowości w badaniach ruchów Browna¹

Zenon E. Roskal

Katolicki Uniwersytet Lubelski Jana Pawła II, Wydział Filozofii

Marian Smoluchowski's approach to the causality principle in the Brownian motion research

Abstract

Marian Smoluchowski solved the greatest scientific problem of his time. It was the explanation of the phenomenon of the Brownian motion. In the article, I show that Smoluchowski in fact in this explanation used an ontological interpretation of the causality principle, although in his writings he applied it also in the epistemological interpretation. This is understandable because in the scientific practice some kinds of ontological commitment are required.

¹ Chciałbym podziękować J. Rodzeniowi, Z. Wróblewskiemu i J. Golbiakowi za uwagi sformułowane na kanwie lektury wstępnych wersji tego artykułu, które pozwoliły na dopracowanie jego językowej formy.

Keywords

causality principle; Brownian motion; history of physics; philosophy of science

Wstęp

Zasada przyczynowości doskonale ilustruje obecność filozofii w nauce. W badaniach ruchów Browna prowadzonych w fizyce na początku ubiegłego stulecia zasada ta była wielokrotnie wykorzystywana. Marian Smoluchowski (1872–1917) w swoich pracach naukowych także stosował zasadę przyczynowości². W publikacjach poświęconych temu zagadnieniu wprost na nią jednak się nie powoływał, aczkolwiek zakładał ją usiłując kauzalnie wyjaśnić zjawisko ruchów Browna. Pisał natomiast wprost o zasadzie przyczynowości w swoich pracach popularnonaukowych. Problematyka związku przyczynowego pojawia się w jego artykułach poświęconych statystycznym prawom kinetycznej teorii gazów, ale nie przekłada się to na dyskusję zasady przyczynowości. Smoluchowski zajął tam nowatorskie stanowisko, zgodnie z którym przypadek jest szczególną postacią więzi

² Zasadę przyczynowości wykorzystywał przy omawianiu rozpadu promieniotwórczego radu. Poszukując przyczyny emisji cząstki alfa z wnętrza atomu pisał o przyczynach wewnętrznych tego zjawiska. Uznał jednak, że jest ono zbyt skomplikowane, aby je precyzyjnie ująć matematycznie (por. Smoluchowski, 1916b, s. 79–80; por. także Krajewski, 1967, s. 250).

przyczynowej. Tego wątku, który uwikłany jest w problematykę determinizmu, podejmować jednak nie będę.

Celem tego artykułu jest podanie różnych sformułowań zasady przyczynowości, ale przede wszystkim odpowiedź na pytanie: czy Mariana Smoluchowskiego ujęcie zasady przyczynowości daje się zredukować do epistemologicznej interpretacji, czy też należy uwzględnić także interpretację ontologiczną? Realizacja tego zadania wymaga przede wszystkim przedstawienia funkcjonujących w tradycji filozoficznej sformułowań zasady przyczynowości oraz eksplikacji tzw. fizycznej zasady przyczynowości, która wyraża ujęcie epistemologiczne. Zostanie to dokonane w pierwszej części artykułu. W drugiej części zostaną podane argumenty uzasadniające odpowiedź na pytanie o Mariana Smoluchowskiego rozumienie zasady przyczynowości i sposób jej zastosowania w badaniach ruchów Browna.

1. Epistemologiczne i ontologiczne interpretacje zasady przyczynowości

Zasada przyczynowości była przyjmowana w badaniach naukowych jako postulat metodologiczny poszukiwania wyjaśnień deterministycznych. W najogólniejszym sformułowaniu tej zasady modelem wyjaśnień deterministycznych nie jest jednak eksplikowany w mechanice klasycznej opis stanu układu. Wówczas ta dyrektywa poznawcza, będąca *sui generis* postulatem, pełni rolę definicji w uwikłaniu nauki. Rozpatrywana z punktu

widzenia epistemologii zasada przyczynowości interpretowana jest najczęściej jako schemat rozumowania pozwalającego na realizację funkcji prognostycznej nauki. Ontologiczne aspekty tej zasady ujawniają się wówczas, gdy wychodząc z określonej koncepcji związku przyczynowego próbuje się ustalać strukturę kauzalną świata. Istnieje także negatywne sformułowanie zasady przyczynowości, które można wyartykułować następująco: nicość nie może wytworzyć żadnego realnego bytu (Khamara, 2000, s. 342). Odosobnionym stanowiskiem w filozofii jest odmawianie jakiegokolwiek informatywnej funkcji zasadzie przyczynowości, m.in. Geoffrey J. Warnock (1923–1995). Stanowisko takie spotyka się jednak z silną krytyką (Suchting, 1967, s. 15–16). W XIX i XX-wiecznej refleksji nad poznaniem naukowym zasada przyczynowości była różnie formułowana. Dominujące sformułowania akcentowały głównie epistemologiczne i ontologiczne aspekty.

1.1. Sformułowania zasady przyczynowości

Zdaniem Romana Ingardena (1893–1970) zasada przyczynowości była formułowana na tak różne sposoby, że nie ma ustalonej tradycji, z której można by czerpać. Uwzględniając własną analizę związku przyczynowego formułuje zasadę przyczynowości następująco: „Każde zdarzenie w świecie posiada swoją bezpośrednią (wprost lub nie wprost) albo pośrednią najbliższą przyczynę” (Ingarden, 1981, s. 151; por. także Kobiela, 2007, s. 73–96). Ten punkt widzenia znajdujemy także u Ernesta Na-

gela (1901–1985), który zasadę przyczynowości nazywa prawem przyczynowości i również twierdzi, że nie ma „[...] powszechnie przyjętego sformułowania tego prawa ani też nie ma powszechnej zgody co do tego, co ono stwierdza” (Nagel, 1970, s. 278). Według Nagela zasada przyczynowości ma status postulatu metodologicznego wyznaczającego cel poznaniu naukowemu, „[...] zasada przyczynowości jako dyrektywa badawcza formułuje cel nauk teoretycznych, jakim jest osiągnięcie wyjaśnień *deterministycznych*” (Nagel 1970, s. 283).

Stanisław Mazierski (1915–1993) w monografii na temat praw przyrody, wykorzystując ustalenia Nagela, wyartykułował aż pięć sformułowań zasady przyczynowości, z których dwa wyrażają aspekt ontologiczny. Kolejne dwa sformułowania ukazują epistemologiczny charakter tej zasady. Ostatnie, piąte sformułowanie tej zasady – jego zdaniem – podzielają uczeni, którzy „[...] przypisują jej tylko rolę regulatywną w badaniach przyrodniczych” (Mazierski, 1993, s. 67–68). W ujęciu Władysława Krajewskiego (1919–2006) zasada przyczynowości („każde zdarzenie ma przyczynę”) odróżniona jest od tzw. jednoznacznego determinizmu kauzalnego, który jest równoznaczny z fizyczną zasadą przyczynowości. Zdaniem Krajewskiego należy jeszcze wprowadzić zasadę statystycznego determinizmu kauzalnego, według której „jednakowe przyczyny (w jednakowych warunkach) wywołują z jednakowym prawdopodobieństwem określone skutki” (Krajewski, 1967, s. 242). W nowszych opracowaniach zwraca się także uwagę na to, że zasada przyczynowości może mieć ten sam status co zasada zachowania energii

(por. m.in. Guzzardi, 2014, s. 1269–1270). Ernst Mach (1838–1916) analizując fundamentalne kategorie służące do badania przyrody traktował zasadę zachowania energii jako wariant zasady przyczynowości. Według Macha zasada racji dostatecznej i zasada przyczynowości w swej istocie nie różnią się i fizycznie są równoważne (Guzzardi, 2014, s. 1271).

W tradycji neotomistycznej filozofii przyrody zasada przyczynowości występuje w dwóch wersjach – fizycznej i metafizycznej. Kazimierz Kłósak (1911–1982) powołując się m.in. na prace Desiré Merciera (1851–1926) i Jacquesa Maritaina (1882–1973) twierdzi, że autorzy ci podają nie tylko metafizyczną (ontologiczną) zasadę przyczynowości, ale także formułują tzw. fizyczną (epistemologiczną) zasadę przyczynowości. Pierwsza z tych zasad – według Kłósaka – głosi, że „Byt przygodny, o ile istnieje, istnieje przez przyczynę sprawczą” (Kłósak, 1948, s. 198)³. Fizyczna zasada przyczynowości głosi natomiast, że „W rzeczywistości materialnej bieg wydarzeń jest tak zdeterminowany, że ta sama przyczyna w tych samych warunkach wywołuje zawsze i z konieczności ten sam skutek” (tamże). Kłósak termin „fizyczna zasada przyczynowości” przejął od niemieckiego neoscholastyka Josefa de Vriesa (1898–1989). Termin ten przyjął się w języku polskim, ale współcześnie rozróżnianie dwóch wersji zasady przyczynowości straciło na znaczeniu po analizach przyczynowości przedstawionych przez Mario Bungego.

³ Stanisław Mazierski (1958, s. 27) powołując się na różne dzieła św. Tomasza wymienia aż pięć sformułowań metafizycznej zasady przyczynowości.

Sądzę, że sformułowanie zasady przyczynowości, które pochodzi od Mario Bungego jest najbardziej adekwatne, aczkolwiek nie jest kompletne. Sformułowanie to przede wszystkim unifikuje fizyczną i metafizyczną wersję zasady przyczynowości i między innymi dlatego podważa zasadność rozróżniania dwóch jej wersji. Zgodnie z tym sformułowaniem zasada przyczynowości głosi, że „Każde zdarzenie należące do pewnej klasy C wywołuje zdarzenie należące do pewnej klasy E” (Bunge, 1968, s. 66)⁴. Aczkolwiek w tym sformułowaniu mamy do czynienia z relacjami przyczynowymi pomiędzy klasami zdarzeń, to jednak według tego ujęcia zasady przyczynowości skutek nie tylko w sposób stały i konieczny stowarzyszony jest z przyczyną, ale także jest generowany przez przyczynę.

1.2. Interpretacje zasady przyczynowości

Sformułowania zasady przyczynowości wyrażają zarazem jej interpretacje. Pojawia się jednak pytanie o status metodologiczny zasady przyczynowości. Problemem jest to, czy jest ona sądem syntetycznym, czy też sądem analitycznym. Epistemologiczna interpretacja zasady przyczynowości występuje zarówno

⁴ Takie sformułowanie zasady przyczynowości odrzuca podtrzymywane w tradycji filozoficznej utożsamienie determinizmu z kauzalizmem. Rozwiązanie zaproponowane przez Mario Bungego było krytykowane m.in. przez Richarda Schlegela (1961, s. 72–74), który nie był zawodowym filozofem, ale fizykiem zatrudnionym na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Stanu Michigan.

w wersji syntetycznej jak i analitycznej. Interpretacja ontologiczna faktycznie występuje tylko w wersji syntetycznej i to *a priori* jak i *a posteriori*.

Epistemologiczny aspekt zasady przyczynowości polega na jej związku z przewidywalnością. Kategoria przewidywalności jest jednak zrelatywizowana historycznie (zdarzenia nieprzewidywalne na danym etapie rozwoju nauki stają się przewidywalne na kolejnym etapie tego rozwoju). Przewidywalność jako kategoria epistemologiczna jest konsekwencją zastosowania praw przyrody, które mogą być przyczynowe, ale mogą też nie mieć tej własności. Przykładem są prawa statystyczne i zakazy kwantowe występujące we współczesnej mechanice kwantowej (m.in. zasada Pauliego i reguła Laporte'a). Tylko kiedy prawa przyrody są przyczynowe, przewidywalność można utożsamiać z przyczynowością.

W aspekcie formalno-logicznym przewidywanie nie różni się od wyjaśniania, ale z epistemologicznego punktu widzenia różnice są istotne. Prognozy formułowane na podstawie praw przyczynowych obciążone są niepewnością, która ma swoje źródło m.in. w niekompletności opisu. W przypadku przewidywania występują jeszcze dodatkowe źródła niepewności, które możemy wyartykułować jako możliwe naruszenie reguły *ceteris paribus* polegające na interferowaniu z przyczyną innych, nowych i nieznanych wcześniej, zjawisk (przyczyn dalszych), które mogą wpływać na wyniki prognozy. Zasadnicza różnica pomiędzy naukowym wyjaśnianiem i przewidywaniem polega na tym, że na podstawie praw przyczynowych możemy przed-

stawić w zasadzie zawsze przyczynowe wyjaśnienie, ale tylko w niektórych przypadkach udaje się na podstawie tych praw sformułować także naukową prognozę.

Z ontologicznego punktu widzenia zasada przyczynowości jest jednym ze schematów zachodzenia zmian jakościowych. Ontologiczny charakter przyczynowości wyraża się głównie w tym, że jest ona definiowana jako relacja dwuargumentowa, ale człony tej relacji mogą należeć do różnych kategorii ontologicznych. Najczęściej wymieniane są takie kategorie jak rzecz, zdarzenie, stan rzeczy (stan świata, fakt), proces. W interpretacji zasady przyczynowości podanej przez Romana Ingardena mnogość kombinacji może być zredukowana do trzech typów, gdzie człony związku przyczynowego to 1) dwa zdarzenia lub dwie grupy zdarzeń, 2) zdarzenie i proces, 3) dwa procesy. Ostatecznie Ingarden redukuje zasadę przyczynowości (związek przyczynowy) do relacji pomiędzy dwoma zdarzeniami lub grupami zdarzeń. Odpowiada to sformułowaniu znanemu jako fizyczna zasada przyczynowości, ale tylko formalnie, gdyż relacja przyczynowa w tzw. fizycznej zasadzie przyczynowości wyraża jedynie następstwo czasowe. W ontologicznej wersji zasady przyczynowości zdarzenia powinny być powiązane w taki sposób, że zdarzenie będące przyczyną generuje zdarzenie zwane skutkiem.

Marian Smoluchowski pisząc *explicite* o zasadzie przyczynowości wykorzystuje wyłącznie jej aspekt epistemologiczny. Uważa, że schemat wyjaśniania przyczynowego stosowany w naukach przyrodniczych (nomotetycznych) ma także zastoso-

wanie w naukach historycznych (idiograficznych), chociaż odróżnia te dwa typy nauk, których reprezentantami są odpowiednio fizyka i historia. „Zdarzenie uważamy za wyjaśnione, jeżeli je tym sposobem sprowadziliśmy do przyczyn takich, których sposób działania jest nam dostatecznie znany i dlatego wydaje się nam zrozumiały. Takie tłumaczenie przyczynowe jest to sposób objaśniania nie tylko normalny w życiu codziennym, ale typowy dla nauk przyrodniczych jako też i historycznych. Opiera się on na tzw. prawie przyczynowości, będącym wynikiem przeświadczenia, którego nabywamy nieświadomie, wskutek całego naszego doświadczenia życiowego, i które dlatego ma charakter niemal instynktowny, a prawo to twierdzi: 1) że każde zdarzenie ma swoją przyczynę, 2) że jednakowe przyczyny wywierają skutki jednakowe” (Smoluchowski, 1917, s. 19).

Wypowiedź Smoluchowskiego możemy interpretować w taki sposób, że zasada przyczynowości w jego ujęciu traktowana jest jako twierdzenie empiryczne nadbudowane na całym ludzkim doświadczeniu, czyli jest sądem syntetycznym *a posteriori*. Przypomina to Johna S. Milla interpretację zasad logiczno-matematycznych. Diametralnie odmienną (kantowska) interpretację zasady przyczynowości jako apriorycznego założenia przedstawił Leopold Regner. Według niego „Zasada przyczynowości jest założeniem apriorycznym, które samo przez się nie dostarcza odpowiedzi na pytanie, co w danym jednostkowym wypadku jest racją zaistnienia danej jednostkowej rzeczy. Odpowiedzi na to pytanie można oczekiwać tylko od doświadczenia” (Regner, 1961, s. 68).

Smoluchowski akceptuje pozytywistyczną krytykę zasady przyczynowości i nominalnie przyjmuje zasadę przyczynowości „[...] oczyszczoną z domieszek niejasnych, ludzkich i metafizycznych, jako kwintesencję wszelkich doświadczeń i obserwacji, które wszystkie stwierdzają niezmienną prawidłowość przyrody. Zupełną słuszność przyznajemy także tym, którzy przejęcie się zasadą przyczynowości w tej formie uważają za kardynalny warunek myślenia przyrodniczego i w tym upatrują wysoką wartość wychowawczą fizyki, jak i innych nauk przyrodniczych, że wpajają one tę zasadę w umysł dziecięcy” (Smoluchowski, 1917, s. 24–25). Przy takim rozumieniu zasady przyczynowości „[...] Zadaniem fizyki jest zbadanie prawidłowości występujących w przyrodzie oraz systematyczne przedstawienie ich w sposób, o ile możliwości, zwięzły i prosty” (Smoluchowski, 1917, s. 27). Z wypowiedzi tych wynika, że Smoluchowski akceptował epistemologiczną interpretację zasady przyczynowości. Można jednak pytać, czy ta interpretacja była spójna z jego praktyką naukową, w której poszukiwał nie tylko opisu zjawiska ruchów Browna, ale także przyczyny, która je generuje.

Smoluchowski usiłując sprostać standardom metody naukowej wyznaczonej na przełomie XIX i XX wieku przez empiriokrytycyzm nie mógł otwarcie deklorować, że poszukuje kauzalnej struktury świata. Wiedział, że filozofowie kwestionowali często możliwość przyczynowego wyjaśnienia zjawisk. Jak zauważają Heller i Pabjan „Aplikowanie zasady przyczynowości do nauk empirycznych poddawane było częstej kry-

tyce (Hume, Wittgenstein). Pomiędzy zdarzeniami, traktowanymi jako przyczyna i skutek – argumentowano – można co najwyżej stwierdzić następstwo czasowe, ale nie sam związek przyczynowo-skutkowy; można stwierdzić, że «A nastąpiło po B», ale stwierdzenie, że «A wywołało B» jest już nadinterpretacją” (Heller i Pabjan, 2007, s. 111). Krytyka Hume’a była jednak wielokrotnie podważana (por. m.in. Michotte, 1963, s. 256, 414; Szewczyk, 1980, s. 160–170). Współcześnie także na gruncie nauk kognitywnych (por. m.in. Kruschke i Fragassi, 1996, s. 441–446; Scholl i Tremoulet, 2000, s. 299–309). W początkach ubiegłego wieku, kiedy bardzo silny był pozytywizm, który zadanie nauki widział głównie w opisie zjawisk, tylko epistemologiczna interpretacja zasady przyczynowości wydawała się słuszna. Jednak praktyka naukowa, a zwłaszcza sukcesy atomistyki w wyjaśnianiu rzeczywistości przyrodniczej, pozwalały na wyjście poza tę interpretację. Smoluchowski nie wchodził w otwartą polemikę ze zwolennikami filozoficznego minimalizmu, ale doskonale znał ich argumenty. Uniezależnienie się od dominującej interpretacji świadczy nie tylko o niezależności intelektualnej Smoluchowskiego, ale także o jego wkładzie w rozwój filozofii. Dzięki pracy uczonych takich jak Smoluchowski był możliwy przełom w filozofii polegający na wyjściu poza pozytywistyczną wizję nauki, ale także poza bariery, jakie pozytywistyczna filozofia stawiała na drodze poznania i opanowania przyrody.

2. Zasada przyczynowości i ruchy Browna

Termin „ruchy Browna”, aczkolwiek przyjęty powszechnie w literaturze przedmiotu, bywa jednak kwestionowany, gdyż istnieje – wyprowadzony z greki – termin $\pi\acute{\eta}\delta\eta\sigma\iota\varsigma$ (podskakiwanie, pulsowanie), który jest bardziej adekwatną nazwą dla tego zjawiska. Przewagę ma – nie tylko w języku polskim – nazywanie zjawiska chaotycznych ruchów cząstek zawieszonych w cieczach lub gazach „ruchami Browna”. Nazwa ta wydaje się mało uzasadniona także i z tego powodu, że Jan Ingenhousz (1730–1799) już w 1784 roku opisał zjawisko chaotycznego ruchu cząstek pyłu węglowego na powierzchni alkoholu, co jest interpretowane jako odkrycie „ruchów Browna” (Schlesinger, 2001, s. 641; Smit, 1980, s. 125; por. także Van der Pas, 1971, s. 32). Z drugiej strony twierdzenie to jest kwestionowane jako zbyt entuzjastyczne przypuszczenie, a nawet uważa się, że istnieją rozstrzygające dowody, iż Ingenhousz nie obserwował ruchów Browna (por. Beale, 2011, s. 344–345). Podkreśla się także, że Robert Brown nie tylko o b s e r w o w a ł pyłki roślin w wodnej zawieszynie, ale także w y k o n y w a ł l i c z n e e k s p e r y m e n t y, które pozwoliły mu na poznanie istoty tego zjawiska i tym samym usprawiedliwiają termin „ruchy Browna” (por. Mazo, 2002, s. 3).

Marian Smoluchowski nie tylko opracował teoretycznie zagadnienie ruchów Browna, ale także przedstawił historię badania tego zjawiska. Jako poprzedników Browna wymienia dwóch osiemnastowiecznych biologów Johna Needhama (1713–1781)

i Wilhelma von Gleichen-Rußwurma (1717–1783), którzy mieli obserwować zjawisko, nazwane później ruchami Browna, odpowiednio w 1750 i 1764 roku. Pokazał, że nie tylko jest wybitnym fizykiem, ale również to, że zna dzieje swojej dyscypliny. Najwybitniejsi fizycy na ogół interesowali się historią fizyki. Dobrym przykładem jest Joseph Louis Lagrange (1736–1813), którego znajomość dziejów mechaniki była porównywalna z wkładem, jaki wniósł w jej rozwój. Max von Laue (1879–1960) jest przykładem fizyka, którego zaangażowanie do historii fizyki zaowocowało napisaniem bardzo wartościowej monografii poświęconej dziejom tej dziedziny nauki (*Geschichte der Physik*, 1943).

Z drugiej strony istnieją fizycy, nawet bardzo wybitni, którzy pisząc o dziejach fizyki robią to bardzo niekompetentnie. Przykładem jest urodzony *nota bene* w roku śmierci Smoluchowskiego David Bohm (1917–1992). Błędnie podaje nawet datę odkrycia zjawiska ruchów Browna. „Botanik Brown odkrył w roku 1824, że submikroskopowe cząstki zarodników zawieszane w wodzie wykazują nieregularny i nieustanny ruch bez widocznego źródła energii” (Bohm, 1961, s. 91–92). Nie tylko nie wymienia fizyków, którzy rozwiązali problem ruchów Browna, ale także nieadekwatnie przedstawia to rozwiązanie. Zupełnie pomija w tym opisie średni kwadrat przesunięcia, która to wielkość fizyczna jest kluczem do rozwiązania tego zagadnienia. „Ponieważ cząstka dymu jest uderzana ciągle i w sposób bardzo nieregularny przez molekuly gazu, należy się spodziewać odpowiednio powolnych, lecz nieregularnych fluk-

tuacji prędkości cząstki dymu. Im większa cząstka, tym mniejsze będą fluktuacje” (Bohm, 1961, s. 92)⁵.

Sprawa daty odkrycia tzw. ruchów Browna jest jednak bardziej skomplikowana, gdyż podobne zjawisko opisali wcześniej nie tylko Jan Ingenhousz, ale także John Bywater, w książce pod znanym tytułem *Physiological Fragments: To which are added Supplementary Observations to show that vital and chemical energies are of the same nature, and both derived from solar light*, która ukazała się w 1819 roku. Drugie wydanie książki Bywatera ukazało się właśnie w 1824 r. i jest bardziej znane. Z pewnością jednak Brown nie prowadził swoich obserwacji w roku 1824.

Kilka lat młodszy od Mariana Smoluchowskiego Max von Laue w swojej *Historii fizyki* dał nie tylko bardzo adekwatną charakterystykę ruchów Browna, ale także doskonale oddał znaczenie prac Smoluchowskiego i Einsteina w teoretycznym ujęciu tego zjawiska. Warto także odnotować, że Max von Laue dostrzega pierwszeństwo Smoluchowskiego, który rok wcześniej (1904) niż Einstein opracował teorię ruchów Browna, chociaż opublikował ją rok po publikacji pracy Einsteina. Niezależne badania tego zagadnienia wykonane przez Armina Teskego pozwalają stwierdzić, że Smoluchowski dokonał tego zadania jeszcze wcześniej „[...] był już wówczas, w roku 1903, w posiadaniu teorii ruchów Browna” (por. Teske, 1955, s. 224).

⁵ Warte odnotowania jest też to, że ani tłumacz książki, ani nawet Władysław Krajewski – autor *Słowa wstępnego* nie zauważają tych błędów.

W ujęciu von Lauego „[...] fluktuacje termodynamiczne tłumaczą odkryte w r. 1827 przez botanika Roberta B r o w n a (1773–1858) ruchy wykonywane przez zawieszono w cieczach lub gazach ciała mikroskopowe; po wielu powątpiewaniach okazało się bowiem, że zjawisko to, znane pod nazwą ruchu Browna, jest zjawiskiem czysto termicznym. Jego statystyczną teorię dał w r. 1904 Marian S m o l u c h o w s k i (1872–1917), Einstein ujął ją w formę bodaj ostateczną. Te i inne zjawiska fluktuacyjne stanowią jeden z najmocniejszych dowodów atomistycznej struktury materii; dzięki nim wielu sceptycznie usposobionych uczonych przekonało się do atomistyki” (Von Laue, 1957, s. 157–158)⁶.

Bardziej rozbudowany opis roli Einsteina i Smoluchowskiego w teoretycznym ujęciu ruchów Browna przedstawił Andrzej K. Wróblewski. „Einstein i Smoluchowski wykazali, że bezwładne ruchy cząstek zawiesiny w cieczy są wynikiem ich bombardowania przez cząsteczki cieczy. Doświadczalnie można wyznaczać średnie kwadratowe przesunięcie wybranej cząstki

⁶ Z uwagi na mało erudycyjny charakter *Historii fizyki* Lauego, nie ma w niej bardziej szczegółowych informacji na temat odkrycia Roberta Browna (1773–1858). Pierwsze obserwacje Brown wykonał w czerwcu, lipcu i sierpniu 1827 roku. Opublikował główne wyniki swoich obserwacji w roku 1828, w roku następnym opublikował wyniki uzupełniające. Informacje na temat publikacji Browna możemy znaleźć m.in. w artykule Lymana C. Newella (1923, s. 1279–1281). Aktualny stan badań nad zagadnieniem odkrycia ruchów Browna przedstawiają van der Pas (1971, s. 127–132) oraz Philip Pearle i in. (2010, s. 1278–1289).

w określonym kierunku. Ta wielkość została powiązana z liczbą Avogadra i temperaturą cieczy w podstawowym wzorze opisującym ilościowe cechy ruchów Browna. Dziś wzór ten nosi nazwę równania Einsteina-Smoluchowskiego. Odkrycie dokonane niezależnie przez obu uczonych stanowiło doskonałe potwierdzenie słuszności kinetyczno-molekularnej teorii materii i przyczyniło się do ugruntowania atomizmu” (Wróblewski, 2006, s. 433).

Już z tego opisu można wyciągnąć wniosek, zgodnie z którym nie tylko Smoluchowski, ale i Einstein wykorzystywali w swoich badaniach ruchów Browna zasadę przyczynowości w wersji ontologicznej. Wyjaśnili bowiem ruchy Browna jako „wynik” bombardowania cząstek zawiesiny przez molekuly. Opierając się na tym opisie można dostrzec tu Mario Bungego sformułowanie zasady przyczynowości, w którym jest mowa o generowaniu skutku (ruchy cząstek zawiesiny) przez przyczynę (bombardowanie molekuł).

Sformułowanie Kłósaka tzw. fizycznej zasady przyczynowości uwzględniało pozytywistyczną krytykę zasady przyczynowości i koncentrowało się na epistemologicznych aspektach tej zasady, akcentując determinizm zjawisk fizycznych. Jednakże w pracach Smoluchowskiego poświęconych ruchom Browna nie dostrzegamy tych wątków. Wręcz przeciwnie, na plan pierwszy wysuwane są ontologiczne aspekty zasady przyczynowości wyakcentowane w sformułowaniu Mario Bungego. Także i von Laue charakteryzując osiągnięcia Smoluchowskiego w zakresie badania ruchów Browna zauważa, że ruchy te są zjawiskiem

termicznym, tzn. ich przyczyną są fluktuacje termiczne. W celu lepszego uchwycenia ontologicznej interpretacji zasady przyczynowości, która jak sądzę jest właściwa dla metody obranej przez Smoluchowskiego w badaniach ruchów Browna, warto odwołać się do argumentów wysuniętych przeciwko pozytywistycznej krytyce zasady przyczynowości podanych w *Elementach filozofii przyrody*.

Michał Heller i Tadeusz Pabjan trafnie zauważają w swojej książce, że „Przeciwko [...] krytyce zasady przyczynowości przemawia praktyka naukowa i skuteczność metody naukowej, opartej na budowaniu matematycznych modeli fizycznej rzeczywistości, w których formalne symbole przyporządkowane są (za pomocą odpowiednich reguł) do świata fizycznego. Wynikanie logiczne pomiędzy matematycznymi symbolami modelu wskazuje, że pomiędzy fizycznymi zdarzeniami (lub własnościami świata), które odpowiadają symbolom, również zachodzi takie wynikanie, a nie tylko następstwo czasowe (w matematycznym modelu można w ogóle zrezygnować z parametru czasu). Co prawda samo wynikanie logiczne nie jest jeszcze przyczynowaniem, ale to przyczynowanie skutecznie modeluje” (Heller i Pabjan, 2007, s. 111).

W przypadku Smoluchowskiego diagnoza ta jest wyjątkowo trafna, gdyż z jednej strony sam Smoluchowski nominalnie akceptuje pozytywistyczną krytykę zasady przyczynowości, ale równocześnie z drugiej strony w swojej działalności naukowej, zwłaszcza przy próbach wyjaśnienia ruchów Browna, praktycznie krytykę tę uchyla. W późniejszym okresie wprost krytykował nie tylko anty-atomistyczny fenomenalizm, ale także i pozytyw-

wizm za to, że nie docenia spekulacji i podcina skrzydła rozmowi (por. Krajewski, 2001, s. 185). Smoluchowski, jak sam pisze, „[...] przekonany był o molekularno-kinetycznej istocie ruchów Browna od 1900 roku” (Smoluchowski, 1914, s. 299)⁷. Poszukiwanie dowodów na rzecz teorii kinetyczno-molekularnej w jego przypadku pokrywało się z poszukiwaniem przyczyny ruchów Browna. Zgodnie z Mario Bungego sformułowaniem zasady przyczynowości, skutek dlatego w sposób stały i konieczny stowarzyszony jest z przyczyną, że jest generowany przez przyczynę. Dokładnie w taki sposób rozumie Smoluchowski zasadę przyczynowości, aplikując ją do zagadnienia ruchów Browna. Według Smoluchowskiego istnieje coś takiego jak „mechanizm ruchu Browna” (por. Smoluchowski, 1907, s. 571). Takie sformułowania pokazują, że Smoluchowski poszukiwał (mechanicznej) przyczyny, która generowałaby ruchy Browna i w żadnym przypadku nie ograniczał się do stwierdzenia prawidłowości, którym zjawisko to podlega. Innym argumentem za tezą o poszukiwaniu przyczyny, która generuje ruchy Browna jest to, że Smoluchowski krytykuje konkurencyjne hipotezy przyczynowego wyjaśnienia tego zjawiska. Hipotezy takie były wysuwane przy założeniu, że poszukiwana przyczyna ma postać wewnętrznego źródła energii. Wskazywano w tym kontekście na istnienie sił

⁷ Według Krajewskiego (1956, s. 52) stało się to jeszcze wcześniej. „Przekonania atomistyczne ugruntowały się u młodego uczonego od czasu jego berlińskich badań nad skokiem temperatury, które – jak wspominaliśmy – były jednym ze wspaniałych eksperymentalnych potwierdzeń wniosków teorii molekularno-kinetycznej”.

odpychających między cząsteczkami, sił włoskowatości lub sił elektrycznych (por. Smoluchowski, 1906b, s. 494). Jego krytyka wymierzona była w poszczególne rozwiązania a nie w metodologiczny postulat poszukiwania tego typu wyjaśnień, ani tym bardziej w ontologiczną interpretację zasady przyczynowości. Smoluchowski nie traktował też tych rozwiązań jako matematycznych modeli prognostycznych, którym nic w rzeczywistości nie odpowiada.

Przedstawione przez Smoluchowskiego rozwiązanie problemu ruchów Browna wykorzystuje ontologiczne założenia kinetycznej teorii gazów i ontologiczną interpretację zasady przyczynowości. Przyjmując te założenia Smoluchowski twierdzi, że „ruch Browna powstaje wskutek [podkreślenie REZ] przypadkowych uderzeń drobin cieczy, udzielającym ciałkom odpowiednich prędkości w coraz to innych kierunkach” (por. Smoluchowski, 1906b, s. 495). Chociaż nie pisze o tym wprost, to jednak uzyskiwanie przez mikroskopijne ciała prędkości wiąże się z przekazem pędu, co zgodne jest z koncepcją przyczyny jako oddziaływania dostarczającego energii.

Także w teorię dyfuzji Smoluchowski wiąże makroskopowe zjawiska z mikroskopowymi przyczynami. Przykładem jest wiązanie makroskopowego zjawiska lepkości z mikroskopowym pojęciem średniej drogi swobodnej molekuly (por. Smoluchowski, 1916a, s. 557)⁸. W swoich pracach poświęconych

⁸ Wewnętrzny mechanizm dyfuzji to termiczne ruchy molekuł, które także są przyczyną ruchów Browna.

zagadnieniu ruchów Browna pisał wprost, że usiłuje wyjaśnić wewnętrzny mechanizm dyfuzji i powiązać go ze zjawiskami ruchów molekularnych. W jego ujęciu makroskopowe zjawisko dyfuzji jest przejawem ruchu molekularnego lub fluktuacji gęstości (por. Smoluchowski, 1906a, s. 202). Istotne jest to, że Smoluchowski p o s z u k u j e p r z y c z y n y d a j ą c e g o s i ę bezpośrednio zaobserwować makroskopowego zjawiska na nie dającym się bezpośrednio obserwować poziomie mikroskopowym. Ruchy Browna zgodnie z tą strategią badawczą są generowane przez fluktuacje termiczne molekuł.

W tym kontekście warto jeszcze zauważyć, że Smoluchowski inspirował się sugestiami Richarda Zsigmondy'ego (1865–1929). Według tego chemika, ale także konstruktora ultramikroskopu pozwalającego na bardziej wnikliwe obserwacje ruchów Browna w roztworach koloidalnych, każda cząstka zawiesiny otoczona jest tzw. sferą oddziaływania o pewnym promieniu R , takim, że cząstka podlega ruchowi brownowskiemu tylko wówczas, gdy inne cząstki zawiesiny pozostają w odległości większej niż R . Przyjęcie takich założeń pokazuje, że Smoluchowski nie tylko uznawał termiczny ruch molekuł za przyczynę ruchów Browna, ale także starał się precyzować zakres jej działania (por. Chandrasekhar, 2000, s. 28).

Najlepiej jego interpretacja zasady przyczynowości ujawnia się jednak w projektach eksperymentów, które miały pokazać wpływ fluktuacji termicznych w gazach na przedmioty makroskopowe. Smoluchowski przedstawił rodzaj eksperymentu myślowego, który jednak dość szybko został zrealizo-

wany⁹. W eksperymencie tym miały być pokazane oddziaływania molekuł gazu na małe zwierciadło zawieszone na bardzo cienkiej (grubości kilku dziesiątych mikrona) nici kwarcowej (por. Teske, 1970, s. 87). Promień światła padający na to zwierciadło miał wskazywać jego drgania, które – w opinii Smoluchowskiego – były generowane przez chaotyczne ruchy molekuł gazu. Konstrukcja wykorzystująca światło odbite od zwierciadła zawieszonego na wadze skręceń była już zastosowana w słynnym eksperymencie Cavendisha, ale tam w grę wchodził moment siły o wiele większej wartości. Później rozwiązanie takie było stosowane w konstrukcji galwanometrów. Z uwagi na bardzo wysoką czułość tych instrumentów pokazywały one ruchy Browna, ale wskazania te były wówczas interpretowane jako skutek mikrowstrząsów sejsmicznych. Nieusuwalność szumu termicznego prowadziła do naturalnej granicy czułości tych instrumentów. Gustaf Ising (1926, s. 827) jako pierwszy zwrócił uwagę, że przyczyną tego zjawiska są ruchy Browna, wskazując równocześnie na Mariana Smoluchowskiego, który przewidywał teoretycznie (w 1912 roku) takie zjawisko.

Idea tego eksperymentu była później wielokrotnie realizowana przez różnych fizyków, m.in. A. Houjdika, Pietera Zeemana (1865–1943), ale już po śmierci Smoluchowskiego. Walter Gerlach (1889–1979) pracując z manometrem Heissa

⁹ Po raz pierwszy projekt takiego eksperymentu Smoluchowski przedstawił na Zjeździe Przyrodników w Münster w roku 1912, czyli sześć lat po publikacji, w której przedstawił wyjaśnienie ruchów Browna (por. Teske, 1955, s. 179).

zauważył, że wskazania tego instrumentu pokazują ustawiczne zmiany ciśnienia. Zbadanie tego zjawiska doprowadziło do realizacji idei Smoluchowskiego. Zadanie to wykonał niemiecki fizyk Eugen Kappler (1905–1977), który w 1932 roku, w swojej pracy doktorskiej obronionej na uniwersytecie w Monachium wykorzystał ideę eksperymentu z zawieszonym na cienkiej kwarcowej nici zwierciadłem do wyznaczenia liczby Avogadry i uzyskał znakomity rezultat (por. Metzler, 2014, s. 24130; por. także Becker, 2001, s. 1945) $N_A = 60.59 \times 10^{22} \pm 1\%$. Dokładność pomiaru liczby Avogadry była o rząd wielkości lepsza niż pomiary Perrina, na podstawie których została zaakceptowana teza o realności atomów. Sześć lat później Kappler wykonał eksperyment, w którym ruchy Browna były bezpośrednio obserwowane. Przyczyna ruchów Browna została zatem zwizualizowana (por. Teske, 1955, s. 180–183)¹⁰.

Uwagi końcowe

Istniejące w naturze dynamiczne relacje wiążące obserwowany przy pomocy mikroskopu ruch mikrodrobin zawieszonych w gazach lub cieczach (ruchy Browna) zostały połączone przez Smoluchowskiego z niedającym się obserwować chaotycznym ruchem molekuł (gazu i cieczy). Poziom mikroskopowy, który

¹⁰ W pracy tej reprodukowane są teoretyczne wykresy Smoluchowskiego i fotografie pochodzące z pracy Kapplera.

nie jest dostępny bezpośredniej obserwacji, był przez niego traktowany równie realnie jak poziom makroskopowy rzeczywistości. Smoluchowski nie respektował w badaniach ruchów Browna pozytywistycznej proveniencji fenomenalizmu, który sprowadzał warunkowanie przyczynowe do stałego następstwa zdarzeń, ale dostrzegał generatywną moc przyczyny. Smoluchowski badając ruchy Browna usiłował odkryć przyczynę tych ruchów¹¹ pozostając tym samym w opozycji nie tylko do fenomenalistycznej interpretacji związku przyczynowego, ale także i do racjonalistycznej koncepcji związku przyczynowego, w której utożsamia się przyczynę z racją logiczną. Jego ujęcie zasady przyczynowości faktycznie pokrywało się z jej sformułowaniem podanym przez Mario Bungego.

Bibliografia

- Becker, P., 2001. History and progress in the accurate determination of the Avogadro constant. *Reports on Progress in Physics*, 64 (12), s. 1945–2008.
- Beale, N., Beale, E., 2011. *Echoes of Ingen Housz: The long lost story of the genius who rescued the Habsburgs from smallpox and became the father of photosynthesis*. Salisbury: The Hobnob Press.
- Bohm, D., 1961. *Przyczynowość i przypadek w fizyce współczesnej*. Tłum. S. Rouppert. Warszawa: Książka i Wiedza.

¹¹ „Zasługą Smoluchowskiego jest zwrócenie uwagi na to, że ruch cząstki Browna jest wynikiem fluktuacji w liczbie zderzeń atomów z cząstką, polegającej na złożeniu wielu zderzeń w jednym kierunku” (Budzanowski, 2003, s. 34).

- Budzanowski, A., 2003. Znaczenie prac Mariana Smoluchowskiego dla fizyki subatomowej. W: A. Strzałkowski (red.), *Marian Smoluchowski: Od teorii atomistycznej do fizyki współczesnej*. Kraków: Polska Akademia Umiejętności, s. 33–42.
- Bunge, M., 1968. *O przyczynowości: Miejsce zasady przyczynowej w nauce współczesnej*. Tłum. S. Amsterdamski. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
- Bywater, J., 1824. *Physiological fragments: To which are added supplementary observations to show that vital and chemical energies are of the same nature, and both derived from solar light*. London.
- Chandrasekhar, S., 2000. Marian Smoluchowski as the founder of the physics of stochastic phenomena. W: S. Chandrasekhar, M. Kac, R. Smoluchowski (red.), *Marian Smoluchowski: His life and scientific work*. Warszawa: Polish Scientific Publishers PWN, s. 21–28.
- Guzzardi, L., 2014. Energy, metaphysics, and space: Ernst Mach's interpretation of energy conservation as the principle of causality. *Science & Education*, 23 (6), s. 1269–1291.
- Hannikainen, I., 2010. Questioning the causal inheritance principle. *THEORIA. An International Journal for Theory, History and Foundations of Science*, 25 (3), s. 261–277.
- Heller, M., Pabjan, T., 2007. *Elementy filozofii przyrody*. Tarnów: Biblos.
- Ingarden, R., 1981. *Spór o istnienie świata*, t. 3. *O strukturze przyczynowej realnego świata*. Tłum. D. Gierulanka. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
- Ising, G., 1926. A natural limit for the sensibility of galvanometers. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1 (4), s. 827.
- Khamara, E., 2000. Hume against Locke on the causal principle. *British Journal for the History of Philosophy*, 8 (2), s. 339–343.
- Kłósak, K., 1948. Metafizyczna i fizyczna zasada przyczynowości wobec relacji niedokładności W. Heisenberga. *Roczniki Filozoficzne*, 1, s. 198–213.
- Kobiela, F., 2007. Ontologiczne ujęcie przyczynowości u R. Ingardena. *Kwartalnik Filozoficzny*, 35 (2), s. 73–96.

- Krajewski, W., 1956. *Światopogląd Mariana Smoluchowskiego*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
- Krajewski, W., 1967. *Związek przyczynowy*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
- Krajewski, W., 2001, Marian Smoluchowski: A forerunner of the chaos theory, *Poznan Studies in the Philosophy of the Sciences and the Humanities*, 74, s. 185–188.
- Laue, von M., 1957. *Historia fizyki*. Tłum. A. Teske. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
- Kruschke, J.K., Fragassi, M.M., 1996. The perception of causality: Feature binding in interacting objects. W: G.W. Cottrell (red.), *Proceedings of the Eighteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society*, Lawrence Erlbaum, s. 441–446.
- Mazierski, S., 1958. Zasada przyczynowości w aspekcie fizykalnym i filozoficznym. *Zeszyty Naukowe KUL*, 1 (4), s. 27–42.
- Mazierski, S., 1993. *Prawa przyrody: Studium metodologiczne*. Lublin: Redakcja Wydawnictw Katolickiego Uniwersytetu Lubelskiego.
- Mazo, R.M., 2002. *Brownian Motion: Fluctuation, dynamics and applications*. Oxford: Clarendon Press.
- Metzler, R. *et al.*, 2014. Anomalous diffusion models and their properties: Non-stationarity, non-ergodicity, and ageing at the centenary of single particle tracking. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 16, s. 24128–24164.
- Michotte, A., 1963. *The perception of causality*. New York: Basic Books.
- Nagel, E., 1970, *Struktura nauki: Zagadnienia logiki wyjaśnień naukowych*. Tłum. J. Giedymin, B. Rassalski, H. Eilstein. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
- Newell, L.C., 1923. Robert Brown and the discovery of the Brownian movement. *Industrial & Engineering Chemistry*, 15 (12), s. 1279–1281.
- Pearle, P. *et al.*, 2010. What Brown saw and you can too. *American Journal of Physics*, 78 (12), s. 1278–1289. arXiv.org > physics > arXiv:1008.0039
- Regner, L., 1961. Indeterminizm w mechanice kwantowej a zasada przyczynowości w świetle filozofii św. Tomasza. *Roczniki Filozoficzne*, 9 (3), s. 65–82.

- Schlegel, R., 1961. Mario Bunge on causality. *Philosophy of Science*, 28 (1), s. 72–82.
- Scholl, B., Tremoulet, P.D., 2000. Perceptual causality and animacy. *Trends in Cognitive Sciences*, 4, s. 299–309.
- Shlesinger, M.F., 2001. Physics in the noise. *Nature*, 411 (7), s. 641.
- Smit, P., 1980. Jan Ingen-Housz (1730–1799): Some new evidence about his life and work. *Janus*, 67, s. 125–139.
- Smoluchowski, M., 1906a. Sur le chemin moyen parcouru par les molécules d'une haz et sur son rapport avec la théorie de la diffusion. *Bulletin International de l'Académie des Sciences de Cracovie, Classe des Sciences Mathématiques et Naturelles*, s. 202–213.
- Smoluchowski, M., 1906b. Zarys kinetycznej teorii ruchów Browna i roztworów mętnych. *Rozprawy Wydziału Matematyczno-Przyrodniczego Akademii Umiejętności w Krakowie, ser. A*, 46, s. 257–281.
- Smoluchowski, M., 1907. Teoria kinetyczna opalescencji gazów w stanie krytycznym oraz innych zjawisk pokrewnych. *Rozprawy Wydziału Matematyczno-Przyrodniczego Akademii Umiejętności w Krakowie, ser. A*, 48, s. 179–199.
- Smoluchowski, M., 1914. *O fluktuacjach termodynamicznych i ruchach Browna*. Warszawa: Wydawnictwo Redakcji prac matematyczno-fizycznych.
- Smoluchowski, M., 1916a. Drei Vorträge über Diffusion, Brownsche Molekularbewegung und Koagulation von Kolloidteilchen. *Physikalische Zeitschrift*, 17, s. 557–571, 585–599.
- Smoluchowski, M., 1916b. *Uwagi o pojęciu przypadku w zjawiskach fizycznych: Księga Pamiątkowa ku czci Bolesława Orzechowicza*, t. 2. Lwów: Towarzystwo dla Popierania Nauki Polskiej.
- Smoluchowski, M., 1917. *Poradnik dla samouków: Wskazówki metodyczne dla studujących poszczególne nauki*, t. 2. Warszawa: Wydawnictwo A. Heflicha i St. Michalskiego.
- Suchting, W.A., 1967. A note on the principle of causality. *Philosophical Studies*, 18 (1), s. 14–17.
- Szewczyk, J., 1980. *Krytyka przyczynowości Dawida Hume'a: Na podstawie I tomu „Traktatu o naturze ludzkiej”*. Kraków: Wydawnictwo Literackie.

- Teske, A., 1955. *Marian Smoluchowski: Życie i twórczość*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
- Teske, A., 1970. *Metodologiczny aspekt badań nad ruchami Browna*. W: A. Teske, *Wybór prac z historii fizyki i filozofii nauki*. Wrocław – Warszawa – Kraków: Wydawnictwo Polskiej Akademii Nauk.
- Van der Pas, P.W., 1971. The discovery of the Brownian motion. *Scientiarum Historia*, 13, s. 127–132.
- Wróblewski, A.K., 2006. *Historia fizyki od czasów najdawniejszych do współczesności*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.