

Tadeusz Pabjan

Filozoficzne idee w fizyce i kosmologii Alberta Einsteina

Filozofia Nauki 21/2, 131-143

2013

Artykuł został opracowany do udostępnienia w internecie przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego. Artykuł jest umieszczony w kolekcji cyfrowej bazhum.muzhp.pl, gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.

Tadeusz Pabjan

Filozoficzne idee w fizyce i kosmologii Alberta Einsteina

Wbrew temu, co jeszcze nie tak dawno głosił radykalny pozytywizm, filozofii nie da się w żaden łatwy i jednoznaczny sposób oddzielić od nauk empirycznych. Wszystkie wielkie teorie fizyczne są w taki czy inny sposób uwikłane w koncepcje i pojęcia o charakterze typowo filozoficznym. Klasyczny przykład tego typu zależności związany jest z ideą fizycznego relatywizmu, która na początku XX wieku przybrała postać tak zwanej zasady Macha i która w istotny sposób wpłynęła na kształt i interpretację formalizmu teorii względności. Innego przykładu dostarcza kontrowersja z tego samego okresu dotycząca założeń przyjmowanych przy konstrukcji chronologicznie pierwszego modelu kosmologicznego powstającego w ramach rodzącej się kosmologii relatywistycznej (oprócz samej zasady Macha istotną rolę odegrał tu postulat dotyczący statyczności Wszechświata). W obydwu wypadkach filozoficzne idee okazały się istotnym bodźcem stymulującym poszukiwanie konkretnych rozwiązań w ramach jednej z fundamentalnych teorii fizycznych.

Nie ulega wątpliwości, że problematykę wzajemnych relacji między nauką i filozofią, a w szczególności między fizyką i filozofią, warto zawsze osadzać w pewnym kontekście historycznym: to właśnie historia nauki dostarcza najtrafniejszych i najwymowniejszych przykładów ilustrujących i potwierdzających, względnie falsyfikujących, różnego rodzaju tezy filozofów nauki dotyczące tego, w jaki sposób między tymi dwiema dziedzinami wiedzy kształtowały się relacje w przeszłości i w jaki sposób kształtują się one obecnie. Postacią, która posłuży autorowi do zaprezentowania tej tematyki, będzie Albert Einstein — jeden z najbardziej znanych przedstawicieli nauki nowożytnej. Odwoływanie się do największych autorytetów naukowych, a Einstein z całą pewnością do takich należy, jest w tym wypadku uzasadnione tym, że naukowy geniusz uczonego jest zawsze racją przemawiającą za tym, by rów-

niez jego filozoficzną intuicję traktować z szacunkiem porównywalnym do tego, jakim otacza się jego dokonania ściśle naukowe.

Nawet jeśli w konkretnym przypadku okaże się, że uczoney przyjął błędne założenia filozoficzne albo działał pod wpływem apriorycznie przyjętej idei, która została sfalsyfikowana przez wyniki odpowiednich doświadczeń, i jeśli z biegiem czasu jego poglądy filozoficzne ulegną — jak było w wypadku Einsteina — istotnym modyfikacjom, to i tak jego autorytet naukowy decyduje o tym, że tego typu ewolucję można potraktować w kategoriach ważnego argumentu w dyskusji nad mechanizmami odpowiedzialnymi za kształt wzajemnych relacji między nauką i filozofią. Filozoficzne poglądy najbardziej znanych i cenionych ludzi nauki, nawet kontrowersyjne albo wprost błędne, mają w tym sensie większą rangę niż analogiczne opinie mniej znanych jej przedstawicieli, którzy nigdy nie budzą kontrowersji i nie popełniają błędów. Historia zasady Macha i kilku innych wybranych idei filozoficznych obecnych w fizyce i kosmologii Alberta Einsteina dostarcza istotnych racji za słusnością wniosku o ścisłej zależności między teoriami fizycznymi i koncepcjami filozoficznymi.

1. WOBEC EMPIRYSTYCZNEJ FILOZOFII MACHA

Poszukując źródeł filozoficznych poglądów dowolnego autora, należy każdorazowo uwzględnić wyjątkowo szeroki wachlarz bodźców, zagadnień, zdarzeń i opinii, które mogły mieć wpływ na to, w jaki sposób rodziły się i dojrzewały jego późniejsze zapatrywania. W wypadku Alberta Einsteina, który przez całe swoje życie uprawiał swoiście rozumianą filozofię przyrody i filozofię nauki, ale przede wszystkim był pracującym zawodowo fizykiem, źródeł filozofii należy poszukiwać również w obszarze samej nauki. Z całą pewnością filozoficzne poglądy Einsteina kształtowały się i ewoluowały pod wpływem odkryć i wyników uzyskiwanych przez niego podczas pracy nad fundamentalnymi teoriami współczesnej fizyki, przede wszystkim nad szczególną i ogólną teorią względności oraz mechaniką kwantową. Oprócz tego czerpał z bogactwa filozoficznej myśli poprzednich epok (Paty 1993, Butryn 2006, Schilpp 1946). Interesował się m.in. koncepcjami Hume'a, Kanta i Spinozy, jednakże postacią, która go najbardziej zainspirowała, był Ernst Mach (Renn 2007).

Nazwisko tego ostatniego autora pojawia się w kontekście naukowych poszukiwań Einsteina przede wszystkim w związku z zasadą Macha wyrażającą ideę względności masy. Zasada ta była jednakże jedynie kwintesencją propagowanej przez Macha empirystycznej filozofii drugiego pozytywizmu zwanego empiriokrytycyzmem. „Krytyka empirii” polegała w tym wypadku na radykalnym programie oczyszczenia nauk empirycznych ze wszystkich „wtreć metafizycznych”, to znaczy pojęć i koncepcji, które bezpośrednio nie pochodzą z doświadczenia. Zdaniem Macha w pierwszym rzędzie należało uwolnić fizykę z takich pojęć, jak „siła”, „atom”, „absolutna przestrzeń”, „absolutny czas” itp. Gruntowny empiryzm łączył się tu ze skrajnym sensu-

alizmem, zgodnie z którym wartościowa wiedza naukowa pochodzi jedynie z wrażeń zmysłowych. Oznaczało to, że zwłaszcza w fizyce nie ma potrzeby odwoływania się do jakichkolwiek apriorycznych zasad i matematycznych dowodów: ani jedno, ani drugie nie mogą bowiem niczego nowego dodać do świadectwa zmysłów. Nic dziwnego, że tu teorie naukowe spełniają wyjątkowo skromne zadanie: porządkują jedynie wyniki doświadczeń i umożliwiają ich „ekonomiczny”, czyli upraszczający opis (Blackmore 1972, 1992).

Einstein przez wiele lat pozostawał pod wpływem tej filozofii,¹ ale w miarę postępowania prac nad stworzeniem ogólnej teorii względności nabierał do niej coraz większego dystansu. Fascynację ideami Macha widać najwyraźniej we wczesnych pracach Einsteina. Dobrym przykładem jest tu artykuł z 1905 roku zawierający podstawowe idee szczególnej teorii względności: punktem wyjścia całej teorii jest w tym wypadku dokładna analiza pomiarów przeprowadzanych przez różnych obserwatorów, natomiast tzw. efekty relatywistyczne wyprowadzone na podstawie tej analizy sprowadzają się zaś jedynie do postulowanego przez Macha ekonomicznego opisu stwierdzanych doświadczalnie faktów (Einstein 1905). Nawet jednak w szczególnej teorii względności jest już obecne ziarno aprioryzmu zapowiadające późniejsze odejście Einsteina od empirystycznej filozofii Macha: stanowią go dwa fundamentalne założenia, bez których sformułowanie szczególnej teorii względności nie byłoby możliwe — szczególna zasada względności i stałość prędkości światła. Zostały one, podobnie jak analogiczne założenia obecne w ogólnej teorii względności, ocenione przez Macha jako niedopuszczalne uogólnienie, które nie ma żadnych podstaw w wynikach doświadczeń.

Jeśli chodzi o samą zasadę Macha — niekiedy w tym kontekście używa się określenia „zasada Leibniza–Macha”² — to tym mianem Einstein określał wynikającą z empiriokrytycznej filozofii ideę względności masy (lub równoważnej masy bezwładności ciała). Sam Mach wyrażał tę ideę w następujący sposób:

Nie musimy odnosić prawa bezwładności do jakiejś szczególnej przestrzeni absolutnej. Przeciwnie, stwierdzamy, że zarówno te masy, które wedle przyjętego sposobu wyrażania się oddziałują na siebie pewnymi siłami, jak również i te, które nie wywierają na siebie żadnych sił, pozostają do siebie nawzajem w identycznych stosunkach ze względu na przyspieszenie, i dlatego wszystkie masy można traktować jako pozostające we wzajemnym związku (Mach 1974: 220).

Wymowa tego cytatu jest jednoznaczna: masa nie jest absolutną, wewnętrzną własnością ciała, ale jest uzależniona od jego oddziaływania ze wszystkimi innymi

¹ „It was Ernst Mach, who, in his *History of Mechanics*, shook this dogmatic faith; this book exercised a profound influence upon me in this regard while I was a student. I see Mach's greatness in his incorruptible skepticism and independence; in my younger years, however, Mach's epistemological position also influenced me very greatly, a position which today appears to me to be essentially untenable” (Einstein 1946: 21).

² Z racji podobieństwa tej idei do relacyjnej (kausalnej) teorii czasu i przestrzeni sformułowanej pierwotnie przez Leibniza; na ten temat, por. Heller 1993: 94–115.

masami obecnymi we Wszechświecie. W konsekwencji globalny rozkład całej materialnej zawartości Wszechświata powinien jednoznacznie określać lokalną fizykę — na przykład masę każdego z ciał traktowanych osobno. Dla Einsteina było jasne, że stanowiące trzon nowożytnej nauki teorie fizyczne nie uwzględniały tego rodzaju uniwersalnej zależności. W pisanej z perspektywy czasu autobiografii Einstein nie ukrywał, że omawiana koncepcja przez długi czas wydawała mu się atrakcyjna i wyjątkowo przekonująca.³ Nic dziwnego, że chęć stworzenia teorii, która w pełni urzeczywistniałaby zasadę Macha, była dla niego jednym z głównych motywów pracy nad ogólną teorią względności. „W konsekwentnej teorii względności — pisał — nie powinno być bezwładności względem ‘przestrzeni’, lecz tylko bezwładność jednych mas względem innych” (Einstein 1917: 145). Jedno spojrzenie na równania pola stanowiące konstytutywny element ogólnej teorii względności pozwala się przekonać, że zasada Macha rzeczywiście znalazła się w samym sercu tej teorii: tensor energii-pędu, opisujący globalny rozkład wszystkich mas we Wszechświecie, jednoznacznie określa tu geometrię czasoprzestrzeni, a przez to determinuje charakter lokalnych oddziaływań między ciałami.

2. OD SCEPTYCZNEGO EMPIRYKA DO WIERZĄCEGO RACJONALISTY

W roku 1915 Einstein nie miał większych wątpliwości, że w ogólnej teorii względności rzeczywiście udało mu się w pełni zrealizować ideę Macha dotyczącą względności masy. W jednym z listów skierowanych do Macha zaznaczył wyraźnie, że jego własna teoria jednoznacznie potwierdza słuszność tej idei: „[ogólna teoria względności] jest koniecznym następstwem tego, że bezwładność pochodzi ze wzajemnego oddziaływania ciał — dokładnie w myśl Pańskiej krytyki Newtonowskiego doświadczenia z obracającym się wiadrem” (cyt. za Heller 1993: 138). W tym samym liście Einstein podkreślił również, że idee Macha były dla niego natchnieniem, gdy pracował nad ogólną teorią względności, i nie omieszkał wyrazić swojej radości z tego powodu, że spodziewa się, iż oczekiwane wyniki doświadczeń mających ostatecznie potwierdzić słuszność tej teorii, dostarczą zarazem dowodów na poprawność samej idei Macha: „W przyszłym roku podczas zaćmienia Słońca zostanie sprawdzone, czy Słońce zakrzywia promienie świetlne lub, innymi słowy, czy słuszne jest zasadnicze i fundamentalne założenie o równoważności przyspieszonego układu odniesienia i pola grawitacyjnego. Jeśli tak jest istotnie, to Pańskie, będące źródłem natchnienia, prace nad podstawami mechaniki otrzymają błyskotliwe potwierdzenie. [...] Możliwość doniesienia Panu o tym jest dla mnie powodem dużej radości” (Heller 1993: 138).

³ „Mach conjectures that in a truly rational theory inertia would have to depend upon the interaction of the masses, precisely as was true for Newton’s other forces, a conception which for a long time I considered as in principle the correct one” (Einstein 1946: 29).

Tymczasem jednakże okazało się, że sam Mach odciął się od interpretacji, którą Einstein nadawał jego ideom. W wydanej w roku 1921 książce *Zasady optyki fizycznej* Mach wyraził swój krytycyzm pod adresem teorii względności (główny zarzut dotyczył rzekomego dogmatyzmu obecnego w metodzie Einsteina) i zaprotestował przeciwko traktowaniu siebie jako jej prekursora (Mach 1921).⁴ Co zrozumiałe, Einstein nie krył swego zaskoczenia i zarazem rozczarowania postawą Macha. Na jednej z konferencji, która miała miejsce w Paryżu w roku 1922, stwierdził, że Mach był dobrym fizykiem, ale jednocześnie kiepskim filozofem. Epizod ten był jednakże jedynie końcowym etapem długiego procesu, w którym Einstein stopniowo uświadamiał sobie, że czysto empirystyczna filozofia Macha nie jest słuszna, a w każdym razie nie jest wystarczająca do zbudowania ogólnej teorii względności. Wymownym świadectwem „filozoficznego nawrócenia” Einsteina są jego własne słowa, w których — z perspektywy czasu — wyraża przekonanie o wyższości matematycznej prostoty nad podejściem czysto empirycznym. Wypowiedzi te można zarazem potraktować jako swego rodzaju rozrachunek Einsteina z filozofią, która fascynowała go w młodości, ale która w późniejszym okresie przestała go zadowalać i dostarczać mu twórczej inspiracji:

Wychodząc ze sceptycznego empiryzmu, po trosze w stylu Macha, przekształciłem się dzięki pracy nad problemem grawitacji w wierzącego racjonalistę, to znaczy w kogoś, kto jedyne autentyczne źródła prawdy doszukuje się w matematycznej prostocie (list do Corneliusa Lanczosa z 24 stycznia 1938 r., cyt. za Heller 2008: 80).

Teoria grawitacji nauczyła mnie jeszcze jednej rzeczy: nawet z najbardziej bogatego zbioru faktów empirycznych nie można wyprowadzić tak skomplikowanych równań. Teoria może być empirycznie potwierdzona, ale nie istnieje droga od doświadczenia do konstrukcji teorii. Równania tak skomplikowane jak równania pola grawitacyjnego mogą być sformułowane jedynie poprzez odkrycie logicznie prostej zasady matematycznej, która całkowicie lub prawie całkowicie określa równania. Po uzyskaniu tych warunków formalnych w postaci dostatecznie silnej, do skonstruowania teorii wystarczy minimalna znajomość faktów; w przypadku teorii grawitacji jest to czterowymiarowość czasoprzestrzeni oraz tensor symetryczny jako wyrażenie dla struktury czasoprzestrzeni; warunki te w połączeniu z niezmienniczością względem grupy ciągłych przekształceń praktycznie determinują równania (Einstein 1946: 89).

Aksjomatyczna baza fizyki teoretycznej nie może być wywiedziona z doświadczenia, lecz musi być swobodnie skonstruowana [...]. Dotychczasowa historia utwierdza nas w przekonaniu, że Natura jest realizacją najprostszych możliwych idei matematycznych. Jestem przekonany, że możemy odkryć za pomocą czysto matematycznych konstrukcji pojęcia i łączące je prawa, które stanowią klucz do rozumienia zjawisk przyrody. Doświadczenie może podpowiedzieć właściwe pojęcia matematyczne, lecz pojęcia te z całą pewnością nie mogą być wyprowadzone z doświadczenia. Doświadczenie pozostaje oczywiście jedynym kryterium fizycznej użytecz-

⁴ Książka ukazała się już po śmierci Macha (zmarł w roku 1916) i nie jest wykluczone, że autorem fragmentów zawierających potępienie teorii względności był redagujący książkę syn Ernsta Macha, Ludwig — zdeklarowany przeciwnik teorii Einsteina — który zwalczał tę teorię przez całe swoje życie. Argumenty za tą hipotezą przedstawia Wolters 1987.

ności konstrukcji matematycznej. Lecz twórcza zasada tkwi w matematyce. Dlatego uważam, że w pewnym sensie czysta myśl może uchwycić rzeczywistość, tak jak marzyli o tym starożytni (Einstein 1954: 267[WW2]).

Przywołane cytaty świadczą wymownie o tym, że to właśnie praca nad ogólną teorią względności uświadomiła Einsteinowi, iż czysty empiryzm nie może dostarczyć skutecznej metody pozwalającej na konstrukcję adekwatnej teorii fizycznej, czyli takiej, która będzie w stanie w poprawny sposób opisać i zarazem wyjaśnić fundamentalne mechanizmy odpowiedzialne za charakter zjawisk przyrodniczych. Doświadczenie może jedynie „podpowiedzieć właściwe pojęcia matematyczne” i dostarczyć „kryterium fizycznej użyteczności konstrukcji matematycznej”, ale nie umożliwia rozpoznania „twórczej zasady” stanowiącej fundament samej teorii. „Twórcza zasada” tkwi w matematyce i może ją uchwycić jedynie „czysta myśl”. Analiza procesu ewolucji idei leżących u podstaw ogólnej teorii względności potwierdza poprawność tego wniosku: punktem wyjścia jest w tym wypadku wynik doświadczenia (fakt równoważności masy bezwładnej i masy grawitacyjnej), ale wynik ten dostarcza jedynie uzasadnienia zasady równoważności, która z punktu widzenia filozofii Macha jest już niedopuszczalnym uogólnieniem. Z perspektywy czasu Einstein będzie wspominał, że punktem zwrotnym stało się dla niego odkrycie, iż najważniejsze znaczenie mają dla jego teorii nie wyniki pomiarów (różnice współrzędnych, które można wyznaczyć za pomocą linijek i zegarów), ale tensor metryczny będący jedynie (a może raczej aż) abstrakcyjnym matematycznym symbolem. Nic dziwnego, że praca nad ogólną teorią względności sprawiła, iż Einstein ze „sceptycznego empiryka” zmienił się w „wierzącego racjonalistę”, który źródła prawdy doszukuje się nie w wynikach doświadczeń, ale w „matematycznej prostocie”.

3. NAJWIĘKSZA POMYŁKA EINSTEINA

Istotnym epizodem, który w zasadniczy sposób przyspieszył proces „filozoficznego nawrócenia” Einsteina, było zbudowanie w 1917 roku chronologicznie pierwszego relatywistycznego modelu kosmologicznego.⁵ Jak wiadomo, kosmologia we współczesnym tego słowa znaczeniu to kosmologia relatywistyczna, czyli dziedzina naukowa budowana na fundamencie ogólnej teorii względności. Zagadnienia kosmologiczne były jednakże przedmiotem analiz zarówno filozofów, jak i przedstawicieli nauk ścisłych na wiele wieków przed teorią Einsteina (Heller 2005). Co istotne, wszystkie „modele kosmologiczne”, które na przestrzeni wieków pojawiały się w tych analizach, były modelami statycznymi. Przekonanie o statyczności wszechświata należało bowiem do założeń tak oczywistych i naturalnych, że najczęściej w ogóle nie widziano potrzeby jego uzasadniania. Problemy interpretacyjne dotyczące tego założenia pojawiły się wtedy, gdy po raz pierwszy próbowano zastosować

⁵ Na temat kosmologii Einsteina i jej filozoficznych uwarunkowań zob. Turek 1982.

fizykę newtonowską do Wszechświata pojmowanego jako największy z możliwych układów fizycznych. Wyłonił się wówczas pierwszy istotny problem kosmologiczny, współcześnie znany pod nazwą paradoksu grawitacyjnego albo paradoksu Seeligera (por. Pabjan 2011). Wyrażał się on w pytaniu o to, dlaczego wszystkie masy obecne we Wszechświecie nie zapadają się pod wpływem własnej grawitacji do jednej ogromnej masy o kształcie sferycznym. Na pewnym etapie poszukiwań rozwiązania tego problemu zaproponowano nawet modyfikację newtonowskiego prawa odwrotnych kwadratów, polegającą na dodaniu (do wzoru na newtonowską siłę grawitacji) specjalnego członu, który przeciwdziałałby sile grawitacji usiłującej zamienić całą materialną zawartość Wszechświata w jedną wielką sferyczną masę.⁶

Po zbudowaniu ogólnej teorii względności stało się jasne, że pojawiła się długo oczekiwana szansa na rozwiązanie problemów „starej”, czyli nierelatywistycznej, kosmologii. Zastosowanie teorii Einsteina do Wszechświata — największego z możliwych układu odniesienia — prowadzi do tzw. zagadnienia kosmologicznego, które ujmuje i wyraża podstawowy problem interpretacyjny „nowej”, czyli relatywistycznej, kosmologii. Problem ten — najkrócej rzecz ujmując i nieco upraszczając sprawę — dotyczy tego, w jaki sposób wszystkie masy obecne we Wszechświecie zakrzywiają jego czasoprzestrzeń i jak w związku z tym wygląda globalna ewolucja historii tej czasoprzestrzeni. Jednym z domagających się wyjaśnienia aspektów zagadnienia kosmologicznego jest oczywiście paradoks grawitacyjny.

W 1917 roku Einstein dał chronologicznie pierwszą odpowiedź na pytanie o wzajemną zależność między masą a czasoprzestrzenią. Był przekonany, że udało mu się nie tylko rozwiązać paradoks grawitacyjny, lecz także w pełni zrealizować samą zasadę Macha. Odpowiedź ta zawarta była w modelu kosmologicznym, który we współczesnych opracowaniach określany jest często mianem „statycznego świata Einsteina”. Znalezione rozwiązanie równań pola przedstawiało Wszechświat wieczny (istniejący bez początku i bez końca), statyczny, o przestrzeni zamkniętej (skończonej), ale nieograniczonej (Einstein 1917). Najciekawszym szczegółem tej historii jest to, że pierwotna postać równań pola w rzeczywistości sugerowała Einsteinowi coś zgoła odmiennego, a mianowicie Wszechświat dynamiczny, w którym odległości między dwoma dowolnymi punktami przestrzeni zmieniają się wraz z upływem czasu. Sama możliwość tego typu ewolucji Wszechświata wydawała się jednakże Einsteinowi na tyle dziwna, że „wymusił” na swoim modelu statyczność, wprowadzając do równań pola tzw. człon kosmologiczny (składający się ze stałej kosmologicznej oznaczonej symbolem Λ pomnożonej przez tensor metryczny),⁷ którego rola sprowadzała się do aktywnego przeciwdziałania przyciągającej sile grawitacji. Co istotne, wprowadzenie do równań pola członu kosmologicznego nie było podykto-

⁶ Tego typu modyfikację zaproponowali m.in. Hugo von Seeliger, Pierre Simon de Laplace, Carl G. Neumann i William Thomson (Lord Kelvin), por. Pabjan 2011: 117–123.

⁷ Einstein zapewne nie przez przypadek wykorzystał symbol Λ zaproponowany przez Seeligera pod koniec XIX wieku w celu rozwiązania paradoksu grawitacyjnego.

wane żadnymi przesłankami o charakterze merytorycznym, a jedynie potrzebą uzyskania statycznego modelu kosmologicznego. Nic dziwnego, że epizod ten traktuje się powszechnie jako najbardziej jaskrawy i zarazem wymowny przykład tego, że na proces powstawania teorii ściśle naukowych (zarówno na kontekst odkrycia, jak i na kontekst uzasadnienia) znaczący wpływ mają filozoficzne poglądy uczonych. Naukowy dorobek i autorytet Einsteina stanowią dodatkową rację przemawiającą za słusznością tego wniosku: jeśli tej klasy fizyk dokonuje korekty stworzonej przez siebie teorii pod wpływem idei filozoficznej, to należy się spodziewać, że postępują tak samo inni, mniej znani przedstawiciele nauki.

W roku 1917, gdy Einstein opublikował swój pierwszy artykuł kosmologiczny, astronomowie obserwowali już przesunięcie ku czerwieni w widmach niektórych gwiazd (ciągle jeszcze nie wiadano wtedy, czy gwiazdy te należą do Drogi Mlecznej, czy też do podobnych, ale różnych od niej, odległych struktur kosmologicznych). Nieco później — na początku lat dwudziestych XX wieku — przesunięcia te po raz pierwszy zinterpretowano jako efekt ucieczki zawierających te gwiazdy galaktyk, które okazały się wielkoskalowymi strukturami kosmologicznymi podobnymi w swej budowie do Drogi Mlecznej, ale oddalonymi od niej o setki milionów (a nawet o całe miliardy) lat świetlnych. W roku 1929 Edwin Hubble sformułował prawo ustalające liniową zależność prędkości ucieczki galaktyk od ich odległości od Ziemi. Ponad wszelką wątpliwość stało się jasne, że Wszechświat nie jest — jak chciał tego Einstein — statyczny. Równania pola okazały się „mądrzejsze” od ich autora, który dopiero na początku lat trzydziestych przyznał, że wprowadzenie stałej kosmologicznej było największą pomyłką jego życia.⁸ Zdarzenie to po raz kolejny uświadomiło Einsteinowi, jak wielki potencjał drzemie w metodzie konstruowania — a może raczej odgadywania — matematycznych struktur, które po odpowiednim zinterpretowaniu (interpretacja formalizmu polega na odniesieniu go do dziedziny, którą w wypadku teorii Einsteina stanowi cały materialny Wszechświat) stają się teoriami fizycznymi. Filozofia Macha wydawała się w tej perspektywie konstrukcją zbudowaną na wyjątkowo kruchych fundamentach. Niebawem zaś miały pojawić się kolejne podważające ją argumenty.

4. PUSTY ŚWIAT DE SITTERA

Publikując w roku 1917 swoją pierwszą pracę kosmologiczną, Einstein był głęboko przekonany, że istnieje tylko jedno rozwiązanie równań pola i tylko jeden odpowiadający temu rozwiązaniu model kosmologiczny, w którym zasada Macha znajduje swoją pełną realizację: globalny rozkład materii statycznego Wszechświata jednoznacznie określa jego geometrię, a geometria jednoznacznie określa całą lokalną

⁸ Dzisiaj wiadomo, że była to szczęśliwa pomyłka, ponieważ zachowanie stałej kosmologicznej w równaniach pola pozwala przynajmniej w pewnym zakresie wyjaśnić niektóre problemy kosmologii relatywistycznej, np. problem ciemnej energii, por. Weinberg 1989 oraz Goldsmith 1998.

fizykę modelu. Jak na ironię, w tym samym roku Willem de Sitter znalazł kolejne rozwiązanie równań pola i kolejny odpowiadający mu model kosmologiczny (Sitter 1917), co samo w sobie stawiało już pod znakiem zapytania poprawność interpretacji Einsteina. Na dodatek okazało się, że rozwiązanie de Sittera przedstawia model kosmologiczny, w którym struktura czasoprzestrzeni jest dobrze określona, ale zarazem średnia gęstość materii jest zerowa, co odpowiada Wszechświatowi o całkowicie pustej czasoprzestrzeni. Był to bardzo mocny argument, jeśli nie przeciwko samej zasadzie Macha, to na pewno przeciwko sposobowi, w jaki Einstein tę zasadę rozumiał i interpretował. Zerowa gęstość materii przy dobrze określonej strukturze czasoprzestrzeni oznaczała bowiem, że nie jest tak, iż o geometrii Wszechświata i o jego lokalnej fizyce jednoznacznie decyduje globalny rozkład materii. Nie ulegało wątpliwości, że pusty Wszechświat przynajmniej w pewnym zakresie falsyfikuje zasadę Macha i stanowi rację przemawiającą za słusznością koncepcji przeciwnej, sformułowanej pierwotnie przez Newtona, który postulował obecność absolutnej przestrzeni i absolutnego czasu. Z drugiej jednak strony wydawało się, że model de Sittera pozostaje w całkowitej sprzeczności z wynikami podstawowych obserwacji astronomicznymi, które ponad wszelką wątpliwość dowodzą, że przestrzeń Wszechświata nie jest pusta.

Dodatkową zagadkę związaną z pustym modelem de Sittera stanowił wniosek zawarty w jednej z opublikowanych w tym okresie prac Georges'a Lemaître'a (Lemaître 1925), z której wynikało, że model ten przedstawia świat ekspandujący: dowolne dwie cząstki próbne umieszczone w tym modelu oddalają się od siebie. Wniosek ten zaskoczył nie tylko Einsteina, który statyczność Wszechświata zdawał się traktować w kategoriach warunku *sine qua non*, lecz także samego de Sittera, który podobnie jak twórca teorii względności, poszukiwał statycznego rozwiązania równań pola i był przekonany, że właśnie takie rozwiązanie znalazł. W tym okresie — w połowie lat dwudziestych XX wieku — obserwowane w widmach gwiazd przesunięcie ku czerwieni interpretowano już jako argument za ucieczką galaktyk, co prowadziło do frapującego paradoksu: z dwóch znanych modeli kosmologicznych — Einsteina i de Sittera — żaden nie wydawał się pasować do wyników obserwacji astronomicznych. Pierwszy z nich zawierał materię, ale nie przewidywał ucieczki galaktyk, drugi uwzględniał ekspansję czasoprzestrzeni, ale nie zawierał materii. Paradoks ten stawał się jeszcze bardziej wyraźny dzięki spostrzeżeniu, którego dokonali w tym samym okresie Lemaître i współpracujący z nim Arthur Eddington. Zauważyli, że statyczny model Einsteina jest niestabilny, co oznacza, że nawet najmniejsze zaburzenie gęstości materii może wytrącić Einsteinowski świat ze stanu równowagi i zapoczątkować proces jego ekspansji lub kontrakcji. Wszystko wskazywało na to, że same rozwiązania równań pola grawitacyjnego wykazują dziwną nieprzychylność względem koncepcji statycznego Wszechświata.

Co ciekawe, żaden ze wspomnianych uczonych nie wiedział o tym, że rozwiązanie tego paradoksu już w tym czasie istniało i było zawarte w dwóch pracach rosyjskiego matematyka Aleksandra Friedmana (Friedman 1922, 1924), które mimo że

zostały opublikowane w liczącym się niemieckim czasopiśmie („Zeitschrift für Physik”), przez długi czas były niemal całkowicie niezauważone przez zachodni świat naukowy. Okazało się, że Friedman znalazł całą klasę rozwiązań równań pola,⁹ w której rozwiązania Einsteina i de Sittera były jedynie szczególnymi przypadkami: w klasie wszystkich możliwych rozwiązań równań pola istnieje tylko jedno rozwiązanie opisujące model statyczny (znalezione przez Einsteina) i nieskończenie wiele rozwiązań odpowiadających modelom Wszechświata, który rozpoczynając swoją kosmiczną ewolucję od początkowej osobliwości, rozszerza się w nieskończoność, ewentualnie rozszerza się tylko do pewnego momentu, a następnie zaczyna się kurczyć i zapada się do punktu w końcowej osobliwości. Wszystkie modele rozszerzające się nieustannie (bez fazy kurczenia) przy nieskończeniu długim czasie przechodzą w model de Sittera.

Einstein (1922) odniósł się sceptycznie do wyników uzyskanych przez Friedmana, określając je mianem „podejrzanych”, jednak później pod wpływem wyjaśnień zawartych w liście Friedmana zmienił zdanie i uznał jego prace za „poprawne i rzucające nowe światło” na zagadnienie kosmologiczne. Przyznał również, że artykuły Friedmana przekonały go, iż „równania pola dopuszczają dla struktury przestrzeni na równi ze statycznymi także i dynamiczne (tj. zmienne względem czasu) sferycznie-symetryczne rozwiązania” (Einstein 1923). Gdy Einstein pisał te słowa, ciągle jeszcze miał nadzieję, że rozwiązania dynamiczne są jedynie czysto teoretyczną możliwością dopuszczaną z jakichś powodów przez matematyczny formalizm jego teorii. Dopiero mocne dowody empiryczne w postaci dobrze potwierdzonych wyników obserwacji astronomicznych przekonały go, że czysto teoretyczna możliwość faktycznie znajduje swoją realizację w fizycznym Wszechświecie.

5. ZAMIAST WNIOSKÓW

Idee filozoficzne uwikłane w teorie fizyczne żyją własnym życiem i ewoluują pod wpływem wyników doświadczeń i ściśle naukowych argumentów, które pojawiają się w ramach tych teorii. O randze i doniosłości tego typu idei świadczy między innymi to, czy czas spycha je do lamusa historii i ogranicza do roli mało istotnych epizodów, które z określonych powodów, choć czasem dość przypadkowo, zainteresowały ludzi nauki, czy też odwrotnie — dodaje kolejne rozdziały do ich „biografii” i sprawia, że nieustannie inspirują one uczonych do poszukiwania nowych rozwiązań i formułowania kolejnych odpowiedzi na zawarte w tych ideach pytania. Jeśli pod tym kątem spojrzeć na omówione zagadnienia dotyczące zasady Macha i założenia statyczności Wszechświata, to istotnie pretendują one do miana idei ważnych i doniosłych. Zwłaszcza pierwsza z tych idei okazała się niezwykle

⁹ Ściśle rzecz biorąc, Friedman nie znalazł wprost tych rozwiązań, ale przeanalizował je jakościowo (analiza ta została powtórzona w podręczniku Tolmana 1934). Formalne znalezienie rozwiązań omawianych przez Friedmana przypisuje się dosyć często H. P. Robertsonowi (1933).

żywotna i inspirująca: dyskusja nad możliwością pełnego zrealizowania zasady Macha w ogólnej teorii względności trwa nieprzerwanie od czasów Einsteina do dzisiaj. Z kolei problem statyczności Wszechświata, mimo że został rozstrzygnięty jednoznacznie za pomocą obserwacji astronomicznych przeprowadzonych już niemal sto lat temu, nadal pozostaje ważnym zagadnieniem kosmologicznym, analizowanym w kontekście dyskusji nad krzywizną czasoprzestrzeni Wszechświata.

Powszechnie podkreśla się niemożność pełnego zrealizowania zasady Macha w ramach einsteinowskiej teorii grawitacji (Raine 1975, 1981), przy czym wspomniane puste modele kosmologiczne nie są jedynym argumentem za tego rodzaju niemożnością. Przemawia za nią również sama idea geometryzacji pola grawitacyjnego, stanowiąca rdzeń teorii Einsteina (Heller 1970). Rozmaitościowy charakter czasoprzestrzeni powoduje bowiem, że każda czasoprzestrzeń niezależnie od swojej globalnej struktury jest lokalnie płaska. Rozbieżność między lokalną i globalną geometrią modelu przemawia przeciwko zasadzie Macha i wyjaśnia, „dlaczego einsteinowska teoria grawitacji tak uporczywie broni się przed wszelkimi próbami jej *umachowienia*” (Heller 1970: 49). Nie oznacza to oczywiście, że takie próby nie są podejmowane w ramach analizowania znanych i poszukiwania nowych rozwiązań równań pola.

Druga ze wspomnianych idei — statyczność Wszechświata — również nie przestaje inspirować uczonych, chociaż jej wpływ ma nieco inny charakter niż w wypadku zasady Macha. Nie ulega wątpliwości, że czasoprzestrzeń Wszechświata nie jest statyczna: ucieczka galaktyk ponad wszelką wątpliwość potwierdza jej ekspansję. Nie jest jednak oczywiste, czy ekspansja ta będzie trwać wiecznie, czy też zostanie zatrzymana przez siłę grawitacji generowaną przez materię wypełniającą Wszechświat. Gdyby zrealizował się ten ostatni scenariusz, idea Einsteina przynajmniej przez krótki czas (zanim rozpocząłby się proces kontrakcji) znowu wróciłaby do łask. Zaobserwowane w ostatnich latach zagadkowe przyspieszenie ekspansji Wszechświata zdaje się wykluczać taką możliwość, ale co najmniej od czasów Friedmana wiadomo, że same równania pola grawitacyjnego jej nie wykluczają. Brak dostatecznej precyzji pomiarów średniej gęstości materii, podstawowej obserwacji astronomicznej decydującej o tym, czy siła grawitacji faktycznie powstrzyma ekspansję czasoprzestrzeni, nie pozwala na jednoznaczne rozstrzygnięcie tej kwestii.

Okazało się, że dokonane przez Einsteina „odkrycie” niezwyklej skuteczności metody budowania teorii fizycznej na drodze konstrukcji matematycznych modeli fizycznej rzeczywistości ma doniosłe konsekwencje dla całej współczesnej nauki. Filozoficzne nawrócenie „sceptycznego empiryka” i jego przemiana w „wierzącego racjonalistę” były wyraźną zapowiedzią zbliżającej się zmiany w podejściu fizyków do sposobu rozwiązywania problemów w ramach nauk ścisłych, takich jak fizyka. Niezwykła skuteczność matematyki w naukach przyrodniczych (Wiegner 1991) miała odtąd nie tylko wyznaczać pionierski trend w metodologii tych nauk, lecz także dostarczać nowych, fascynujących tematów dla filozofii nauki, w której racjonalność i matematyczność świata przyrody stały się jednym z najważniejszych zagadnień interpretacyjnych (Heller 2006).

Z oczywistych względów historia empirystycznej filozofii Macha i nazwanej jego nazwiskiem zasady postulującej względność masy, a także idei dotyczącej statyczności Wszechświata, została tu zaledwie naszkicowana; szczegółowo omawiają ją autorzy wielu innych, obszernych publikacji (Barbour 1992, Hofer 1994, Pais 1982, Turek 1995, Sokołowski 1987, Butryn 2006). Nie trzeba dodawać, że zagadnienia te nie wyczerpują bogatej tematyki filozoficznych wątków w fizyce Einsteina. Omawiana tu problematyka koncentrowała się w zasadzie tylko na jednej z wielkich teorii, nad którymi pracował ten uczony, tzn. ogólnej teorii względności. Dwa osobne i równie bogate w treść rozdziały filozoficznych poszukiwań Einsteina otwierają szczególna teoria względności i mechanika kwantowa. Obrazu dopełnia jeszcze einsteinowska filozofia nauki jako takiej (metodologia nauk) stanowiąca wyjątkowo bogate źródło refleksji tego uczonego nad istotą i funkcją poznania naukowego.

Naukowo-filozoficzna spuścizna Alberta Einsteina stanowi wyjątkowo wdzięczny przedmiot analiz dla filozofii nauki. Nie dość, że teksty tego autora obfitują w niebanalne z filozoficznego punktu widzenia refleksje dotyczące najważniejszych teorii współczesnej nauki, to jeszcze sam styl jego pracy nad tymi teoriami można bez większego ryzyka błędu określić w kategoriach nauki „nasyconej” filozofią. Zagłębiając się coraz bardziej w tę problematykę, trudno się oprzeć wrażeniu, że w rzeczywistości jest to jednocześnie filozofia „nasycona” nauką.

BIBLIOGRAFIA

- Barbour J. B. (1992), *Einstein and Mach's Principle* [w:] *Studies in the History of General Relativity*, J. Eisenstaedt, A. J. Kox (eds.), Berlin: Birkhäuser, 125–153.
- Blackmore J. T. (1972), *Ernst Mach — His Life, Work, and Influence*, Berkeley–Los Angeles: University of California Press.
- Blackmore J. T. (red.) (1992), *Ernst Mach — A Deeper Look*, Dordrecht: Kluwer.
- Butryn S. (2006), *Zarys filozofii Alberta Einsteina*, Warszawa: Wydawnictwo IFiS PAN.
- Einstein A. (1905), *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, „Annalen der Physik” 17, 891–921.
- Einstein A. (1917), *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie*, „Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften” 1, 142–152.
- Einstein A. (1922), *Bemerkung zu der Arbeit von A. Friedman. Über die Krümmung des Raumes*, „Zeitschrift für Physik” 11, 326.
- Einstein A. (1923), *Notiz zu der Arbeit von A. Friedman. Über die Krümmung des Raumes*, „Zeitschrift für Physik” 16, 228.
- Einstein A. (1946), *Autobiographical Notes* [w:] *Albert Einstein. Philosopher — Scientist*, P. A. Schilpp (ed.), New York: Tudor Publishing Company, 1–94. W artykule numery stron podano zgodnie z (Schilpp 1970).
- Einstein A. (1954), *Ideas and Opinions*, New York: Bonanza Books.
- Friedman A. (1922), *Über die Krümmung des Raumes*, „Zeitschrift für Physik” 10, 377–386.
- Friedman A. (1924), *Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes*, „Zeitschrift für Physik” 21, 326–332.
- Goldsmith D. (1998), *Największa pomyłka Einsteina? Stała kosmologiczna i inne niewiadome w fizyce wszechświata*, Warszawa: Prószyński i S-ka.

- Heller M. (1970), *Zasada Macha w kosmologii relatywistycznej*, „Roczniki filozoficzne” 18(3), 43–49.
- Heller M. (1975), *The Influence of Mach's Thought on Contemporary Relativistic Physics*, „Organon” 11, 271–283.
- Heller M. (1985), *Ewolucja kosmosu i kosmologii*, Warszawa, PWN.
- Heller M. (1993), *Fizyka ruchu i czasoprzestrzeni*, Warszawa, PWN.
- Heller M. (2005), *Zagadnienia kosmologiczne przed Einsteinem*, „Zagadnienia Filozoficzne w Nauce” 37, 32–40.
- Heller M. (2006), *Filozofia i Wszechświat*, Kraków: Universitas.
- Heller M. (2008), *Podglądanie Wszechświata*, Kraków: Znak.
- Hoefer C. (1994), *Einstein and Mach's Principle*, „Studies in History and Philosophy of Science” 25, 287–335.
- Lemaître G. (1925), *Note on de Sitter's Universe*, „Journal of Mathematics and Physics” 4, 37–41.
- Mach E. (1921), *Die Prinzipien der physikalischen Optik. Historisch und erkenntnispsychologisch entwickelt*, Leipzig: Barth.
- Mach E. (1974), *The Science of Mechanics*, La Salle: Open Court.
- Pais A. (1982), *Subtle is the Lord. The Science and Life of Albert Einstein*, Oxford: Oxford University Press.
- Paty M. (1993), *Einstein philosophe — La physique comme pratique philosophique*, Paris: Presses Universitaires de France.
- Pabjan T. (2011), *Paradoks grawitacyjny*, „Zagadnienia Filozoficzne w Nauce” 48, 111–126.
- Raine D. J. (1975), *Mach's Principle in General Relativity*, „Monthly Notices of the Royal Astronomical Society” 171, 507–528.
- Raine D. J. (1981), *Mach's Principle and Space-Time Structure*, „Reports on Progress in Physics” 44, 1152–1195.
- Renn J. (2007), *The Third Way to General Relativity. Einstein and Mach in Context* [w:] *The Genesis of General Relativity*, vol. 3: *Gravitation in the Twilight of Classical Physics. Between Mechanics, Field Theory, and Astronomy*, „Boston Studies in the Philosophy of Science” 250, Dordrecht: Springer, 21–75.
- Robertson H. P. (1933), *Relativistic Cosmology*, „Reviews of Modern Physics” 5, 62–90.
- Sitter de W. (1917), *On the Relativity of Inertia. Remarks Concerning Einstein's Latest hypothesis*, „Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen Proceedings” 19, 1217–1225.
- Schilpp P. A. (ed.) (1970) *Albert Einstein. Philosopher — Scientist*, New York: MJF Books.
- Sokołowski L. M., *Alberta Einsteina filozofia fizyki* [w:] *Filozofować w kontekście nauki*, M. Heller, A. Michalik, J. Życiński (red.), Kraków 1987: PTT, 187–201.
- Tolman R. C. (1934), *Relativity, Thermodynamics and Cosmology*, Oxford: Clarendon Press.
- Turek J. (1982), *Kosmologia Alberta Einsteina i jej filozoficzne uwarunkowania*, Lublin: Redakcja Wydawnictw KUL.
- Weinberg S. (1989), *The Cosmological Constant Problem*, „Review of Modern Physics” 61, 1–23.
- Wigner E. P. (1991), *Niepojęta skuteczność matematyki w naukach przyrodniczych*, „Zagadnienia Filozoficzne w Nauce” 13, 5–18.
- Wolters G. (1987), *Mach I, Mach II, Einstein und die Relativitätstheorie. Eine Fälschung und ihre Folgen*, Berlin–New York: de Gruyter.