

Adam Krawiec, Marek Szydłowski, Paweł Tambor

SWOISTOŚĆ ONTOLOGICZNA I EPISTEMOLOGICZNA KOSMOLOGII JAKO NAUKI O WSZECHŚWIECIE

STRESZCZENIE

W pracy charakteryzujemy swoistość, tj. wyjątkowość kosmologii współczesnej rozumianej jako fizyka Wszechświata. Swoistość ta przejawia się w stosunku do samego przedmiotu badań oraz w stosunku do sposobów zdobywania wiedzy o Wszechświecie, w tym także metod stosowanych do rozwiązywania problemów. Twierdzimy, że kosmologia jest odmienna od standardowej praktyki badawczej fizyki współczesnej (odmienność metodologiczna). Odmienność przedmiotowo-metodologiczna współczesnej kosmologii jest źródłem kontrowersyjności kosmologii (twierdzi tak Helge Kragh (1996)). W pracy wskazujemy brak uzasadnienia takiej jej oceny. Odmienność przedmiotowo-metodologiczna kosmologii nie jest dla nas kontrowersyjna. Identyfikujemy tę odmienność między innymi ze swoistością predykcji (asymetria między retrognozą a prognozą), temporalnością kosmologii związanej z rozwojem technik obserwacyjnych, problemem horyzontu oraz specyfiką problemu warunków początkowych. Wskazujemy na niedookreśloność modelu czasoprzestrzennego w kosmologii w dwóch aspektach: a) problemu warunków początkowych dla ewolucji Wszechświata oraz b) problemu topologicznej niedookreśloności modelu geometrycznego czasoprzestrzeni.

Słowa kluczowe: swoistość kosmologii, kontrowersyjność kosmologii, odmienność przedmiotowo-metodologiczna kosmologii, ewolucja Wszechświata, topologiczna niedookreśloność modelu geometrycznego czasoprzestrzeni.

1. WSTĘP. KOSMOLOGIA I META-KOSMOLOGIA

Metodologiczne, ontologiczne i epistemologiczne problemy inspirowane przez kosmologię relatywistyczną można badać z kilku punktów widzenia. Jednym z nich jest metaprzeciekowa analiza takich kluczowych dla filozofii nauki pojęć jak wyjaśnianie, redukcja, konfirmacja, emergencja etc. Pojęcia te następnie konfrontuje się z praktyką badawczą kosmologii współczesnej. Innym podejściem jest badanie wybranych przypadków (*case study*)

z praktyki badawczej kosmologów, którzy często podejmują dyskusję problemów natury filozoficznej. Możemy wreszcie wychodząc od praktyki badawczej, wyodrębnić to, co z kosmologii może wynikać dla samych idei filozoficznych, które kontekst kosmologiczny może ubogacać, a pewne różniczenia filozoficzne czynić bardziej starannymi. Ta właśnie linia jest bliska autorom pracy, którzy zamierzają badać implikacje kosmologii i jej praktyki badawczej dla samej filozofii.

W nauce nie brakuje uczonych, którzy starają się pomniejszyć rolę filozofii nauki i metodologii dla fizyki. Richard Feynman wyraził na konferencji metodologów pogląd (aprobowany przez większość fizyków) na temat znaczenia tego typu analiz dla fizyki. Stwierdził on, że „Metodologia fizyki jest tak potrzebna fizykom jak ornitologia ptakom”¹. Nie chcemy podejmować dyskusji w kontekście całej fizyki; skupimy się tylko na kosmologii. Twierdzimy, że dla kosmologii zdecydowanie pożądana jest jej ontologiczna, epistemologiczna i metodologiczna refleksja, właśnie ze względu na odrębność i swoistość tej dziedziny badań. Twierdzimy, że być może metodologia fizyki nie daje wskazówek, jak budować fizykę, tym niemniej chcielibyśmy wiedzieć, jakiej rzeczywistości fizyka dotyczy oraz jak ją poznaje. To nie jest recenzowanie fizyki, ale próba jej głębszego zrozumienia. Ponadto, żeby kosmologię uprawiać jako naukę fizyczną, trzeba na samym początku poczynić pewne założenia o charakterze epistemologiczno-metodologicznym. Analiza zasadności tych założeń także leży w obszarze zainteresowań metodologii kosmologii.

W pracy podejmujemy próbę scharakteryzowania przedmiotu i metod kosmologii współczesnej. Przedmiot kosmologii jest zwykle definiowany jako zastosowanie fizyki do Wszechświata jako całości. Celem kosmologii jest wyjaśnienie obecnego stanu Wszechświata i jego przeszłości oraz przewidzenie jego przyszłości. Przyszłość Wszechświata wyprowadza się z deterministycznego modelu kosmologicznego odnoszącego się do przeszłości oraz z praw ewolucji Wszechświata. W kosmologii ma miejsce – inaczej niż w fizyce – przewaga retrodykcji nad predykcją. Badania kosmologiczne należy zaliczyć do nauk typu historyczno-ewolucyjnego; są one podobne pod tym względem do archeologii, paleontologii, ale również np. do biologii ewolucyjnej.

Współczesna kosmologia jest jednym z wiodących obszarów fizyki. Łączy ona w sobie problemy fizyki jądrowej, fizyki cząstek elementarnych (Zinkernagel 2001) z zagadnieniami astronomii i tej możliwościami obserwacyjnymi. Obserwatoria naziemne (optyczne i radiowe) i satelitarne (Hubble Space Telescope w dziedzinie optycznej i ultrafioletu), misje satelitarne IRAS² (infrared astronomical satellite), ROSAT X-Ray oraz eksperymenty dedykowa-

¹ W podobnym duchu wypowiadał się także St. Weinberg, por. *Sen o teorii ostatecznej*, rozdział „Przeciw filozofii”.

² Strona www projektu: <http://irsa.ipac.caltech.edu/Missions/iras.html>.

ne do obserwacji promieniowania relikтового (COBE, WMAP, Planck) otwierają nowe możliwości pomiarowe wielkości fizycznych. Tworzenie map nieba odgrywa ogromną rolę dla wyjaśnienia wielkoskalowej struktury i złożoności Wszechświata.

W fizyce mamy do czynienia z eksperymentem, czyli obserwacją czynną spowodowaną. W astronomii mamy do czynienia z obserwacją niesprowokowaną, natomiast w kosmologii obserwacja jest wprawdzie niesprowokowana, ale obróbka i interpretacja danych noszą istotne znamiona ingerencji badacza. W eksperymentach astronomicznych poszukuje się i następnie obserwuje konkretne zjawiska znaczące dla teorii. Kosmologia byłaby podobna do fizyki, gdyby mogła przeprowadzać eksperymenty. Panuje powszechne przekonanie, że nie jest to możliwe, a sam fakt, że Wszechświat jest jeden, temu zaprzecza. To przekonanie jest oparte na naiwnym rozumieniu eksperymentu. Ostatnio fizycy odkrywają analogię Einsteinowskiej teorii grawitacji do fizyki fazy skondensowanej. Autorzy pracy (Figueiredo, Moraes, Fumeron, Berche, 2017) twierdzą, że pewne materiały posiadają własności analogiczne do własności czasoprzestrzeni Milne'a co otwiera możliwość eksperymentu laboratoryjnego w kosmologii. Zwróćmy uwagę na fakt, że metoda analogii jest tutaj heurystyką.

Postawienie i metody rozwiązywania problemu kosmologicznego mają od początku specyfikę, która odróżnia ten problem od innych zagadnień w fizyce, stanowiąc o odrębności metodologiczno-przedmiotowej współczesnej kosmologii. Ograniczymy się do wskazania głównych, naszym zdaniem, problemów związanych z aplikacją fizyki do Wszechświata. Rozważymy specyfikę przedmiotu kosmologii oraz metodę poznania tego przedmiotu.

Argumentujemy, że źródło kontrowersyjności kosmologii (według określenia Kragh) leży właśnie w niewłaściwej percepcji i ocenie trudności rozwiązywania problemu kosmologicznego — aplikacji znanej nam fizyki do najbardziej złożonego obiektu w największej skali przestrzennej i czasowej, tj. Wszechświata.

2. SWOISTOŚĆ METODOLOGICZNA KOSMOLOGII W OGÓLNOŚCI

Kosmologia może być rozumiana jako nauka ogólna o Wszechświecie (Funk, Wagnall 1974) albo nauka o fizycznych prawach Wszechświata (Petit, Robert, 1985). Kosmologia jest definiowana także jako badanie całego Wszechświata (Liddle, Loveday, 2008). Czasami podkreśla się globalny charakter kosmologii poprzez zaprzeczenie tego, co lokalne, jak ma to miejsce w definicji Sexla i Urbantke: "...In cosmology we try to investigate the World as a whole and not restrict our interest to closed subsystems (laboratory, Earth, solar system, etc.)" (Sexl, Urbantke, 1983).

Mówiąc o Wszechświecie jako całości myślimy, że nie jest on jako globalny osiągalny empirycznie. Czasami można spotkać się z tzw. „*bootstrap definitions*”, gdy np. określa się go w ten sposób, że jest on największym zbiorem obiektów (zdarzeń), do których prawa fizyki mogą być aplikowane w sposób konsystentny i skuteczny (Bondi 1961). Przykładem tego typu definicji jest definicja Ellisa, w której Wszechświat – przedmiot kosmologii – oznacza wszystko co istnieje w sensie fizycznym (Ellis, 2006). Dla naszych celów wygodnie będzie przyjąć, że Wszechświat można traktować jako największy z możliwych układów, który jest grawitacyjnie związany, a przez to tworzy pewną integralność całość.

Na definicję Wszechświata możemy patrzeć z empirycznego punktu widzenia. Wówczas, Wszechświat to część Wszechświata dostępna obserwacjom astronomicznym. Ale to, jak daleko sięgamy do przeszłości Wszechświata, zależy od naszych możliwości technologicznych zwiększających się wraz z postępem technologicznym. W tym sensie ma ona charakter temporalny, określony poprzez możliwości detekcji coraz starszych obiektów.

Kiedy kosmologia wyłoniła się jako samodzielna fizyczna dyscyplina naukowa, traktowano ją jako pewien dział stosowanej teorii grawitacji³. Einsteińskie równania pola dopuszczają rozwiązania kosmologiczne, dlatego rok 1917 można traktować jako moment narodzin kosmologii relatywistycznej – wtedy to Einstein podał pierwsze rozwiązanie kosmologiczne. To datowanie jest do tej pory akceptowane przez kosmologów kwantowych. Na przykład w pętlowej kwantowej teorii grawitacji kosmologia jest postrzegana jako studium przypadku kwantowej teorii grawitacji – wdzięczny obszar do testowania koncepcji kwantowej grawitacji poprzez konstrukcję podejścia opartego na wyjaśnianiu efektywnym (Szydłowski, Tambor 2008; Castellani 2002). Kosmologia w kontekście tych badań jest również postrzegana jako dziedzina nie tyle fundamentalna, co fenomenalistyczna. To co jest pierwotne i przez to bardziej fundamentalne to teoria kwantowej grawitacji.

Wszechświat jest materialny, zbudowany z cząstek, a ich teoretycznym opisem jest model standardowy cząstek oparty na kwantowej teorii pola. Czy model standardowy cząstek należy zaliczyć do kosmologii? Weinberg twierdzi, że do pewnego momentu dzieje kosmologii i fizyki cząstek mogą być traktowane osobno, jednak ostatecznie zbiegają się (Weinberg 2013). Bierzemy pod uwagę tylko cząstki, które są w modelu standardowym. Jeśli kosmologię traktować jako teorię efektywną, jest ona zbudowana na modelu standardowym cząstek, który jest prototypem teorii efektywnej (Uzan 2017; Bain 2013). Jeśli dodamy model standardowy cząstek, to kosmologia, rozu-

³ Jest to punkt widzenia zepchnięcia kosmologii do dziedziny aplikacji OTW, a nie jej rozumienia jako całej znanej teorii fizycznej dedykowanej do wyjaśnienia Wszechświata. W tym kontekście definiując przedmiot kosmologii posługiwano się tzw. zasadą wyłączności oddziaływań grawitacyjnych (Heller 1968).

miana wąsko jako standardowy model kosmologiczny, nie będzie autonomiczna.

We wszystkich koncepcjach kosmologii współczesnej Wszechświat jest traktowany jako obiekt fizyczny. Goenner uważa, że, ponieważ nauki albo dziedziny naukowe można klasyfikować według przedmiotu albo metody badań, adekwatną nazwą dla kosmologii byłaby „kosmofizyka” przez analogię do geofizyki czy też fizyki ciała stałego (Goenner 2010). Taka nazwa wydaje się uzasadniona, ponieważ podkreśla, że przedmiotem kosmologii jest Wszechświat. Naturalnym pytaniem wobec tej definicji terminu „Wszechświat” jest, czy przedmiotem badań kosmologii jest Wszechświat globalny? Jaki jest sens tej globalności? Jak tę globalność rozumieć w kontekście np. niedookreśloności jego kształtu, dokładniej jego topologicznej struktury (Manchak 2009; Malament 1977; Earman 1993).

Kosmologia obejmuje również badania teoretyczne, w których poszukiwania koncentrują się raczej na badaniu teoretycznych możliwości wyjaśnienia zjawisk przez teorie fizyczne. W takim ujęciu eksponujemy epistemologiczny charakter przedmiotu kosmologii. Popularnym określeniem przedmiotu kosmologii jest zatem stwierdzenie, że przedmiotem zainteresowania kosmologów jest ten obszar czasoprzestrzeni, który pozostaje przyczynowo związany z obserwatorem (tzw. horyzont), ale jego rozmiar zmienia się z ewolucją, co również mogłoby sugerować temporalność samego przedmiotu kosmologii. Ponieważ głównym źródłem informacji o Wszechświecie jest promieniowanie elektromagnetyczne, wszystkie zdarzenia przekazu informacji można „zobaczyć” w stożku przeszłości obserwatora. Wtedy dostępna informacja o Wszechświecie będzie leżała w zdarzeniach w bliskim sąsiedztwie stożka przeszłości obserwatora.

Będziemy argumentować, że przedmiotem kosmologii jest także obszar pod oraz poza horyzontem, czyli cała czasoprzestrzeń (wnętrze stożka przeszłości wraz z jego brzegiem). Obszar ten co prawda nie jest dostępny w obecnie realizowanych obserwacjach (np. zjawiska mogą znajdować się poza horyzontem dla dzisiejszego obserwatora), ale w przyszłości taki dostęp będzie możliwy. Możemy mówić o ich „zamrażaniu” pod horyzontem.

Przez problem kosmologiczny rozumiemy rekonstrukcję głównie przeszłej ewolucji Wszechświata w oparciu o jego modele skonstruowane na gruncie Ogólnej Teorii Względności (OTW) tj. relatywistycznej teorii grawitacji opisującej Wszechświat w skalach kosmologicznych. Tego typu modele zwykło się nazywać przedmiotami teoretycznymi kosmologii relatywistycznej w ścisłym sensie. W podejściu redukcjonistycznym wielkoskalowa ewolucja Wszechświata podlega Einsteinowskim równaniom pola, natomiast same procesy fizyczne podlegają oddziaływaniom poza-grawitacyjnym. Zaniedbywanie w kosmologii relatywistycznej poza-grawitacyjnych stopni swobody jest procedurą analogiczną do Arystotelesowskiej. Czasoprzestrzeń OTW jest elementem absolutnym w kosmologii, pełniącym rolę „sceny” dla

rozgrywających się na jej tle procesów fizycznych. Minkowski, twórca koncepcji czasoprzestrzeni, podobnie jak Newton, nadawał jej substancjalistyczną interpretację (Levrini, 2002).

Ellis (1999) wyróżnia w kosmologii następujące dziedziny: *kosmologię obserwacyjną*, której podstawowym zadaniem jest określenie wielkoskalowej geometrii wszechświata oraz rozkładu materii, która go wypełnia, *kosmologię fizyczną*, która interesuje się oddziaływaniami fizycznymi i ich przebiegiem podczas ekspansji Wszechświata począwszy od gorącego wielkiego wybuchu oraz *kosmologię astrofizyczną*, która bada późną ewolucję wielkoskalowych struktur, takich jak galaktyki i gromady galaktyk. Podział Ellisa jest jedynie częściowo adekwatny do praktyki badawczej kosmologów i ujmuje różnorodność kierunków badawczych we współczesnej kosmologii, które wzajemnie się uzupełniają i razem pozwalają na wyjaśnienie mechanizmu powstania i ewolucji Wszechświata fizycznego.

Charakterystykę Ellisa trzeba uzupełnić o *kosmologię teoretyczną*, w której wypracowuje się model standardowy. Niezależnie od tego, że kosmologia obserwacyjna zakłada istnienie takiego modelu, kontynuowane są badania teoretyczne nad konstrukcją lepszego alternatywnego modelu o mniejszej liczbie założeń idealizacyjnych oraz wyjaśniającego trudności, na które natyka model standardowy. Ten obszar teoretycznych poszukiwań jest ważny z uwagi na to, że kosmologia staje się otwarta nie tylko na nowe dane astronomiczne, ale i nowe idee i teorie fizyczne.

Kosmologia współczesna jest doskonałym świadectwem przesunięcia akcentów z teorii naukowej (w przypadku kosmologii jest to teoria grawitacji i inne teorie fizyczne opisujące procesy fizyczne zachodzące we wszechświecie w różnych jego epokach) na modele teoretyczne. Podstawową funkcją modeli teoretycznych jest rozwiązywanie sytuacji problemowej. Ponadto w kosmologii modele takie służą do planowania i przeprowadzenia obserwacji. W praktyce odbywa się to poprzez wyprowadzenie tzw. obserwabli kosmologicznych, np. ustalenia relacji odległość jasnościowa funkcji *redshift* – diagramu Hubble'a.

W kolejnych dwóch częściach pracy zwrócimy uwagę na odrębność przedmiotu kosmologii oraz jej metod w stosunku do fizyki. Specyficzność kosmologii wykażemy zasadniczo w dwóch obszarach: ontologicznym i epistemologicznym. Przekonamy się zarazem, że i jak charakter przedmiotowy i podmiotowy w kosmologii wpływa na metodologię. Owa odrębność określa cechę nazywaną swoistością kosmologii. Niektórzy autorzy, jak Jan Such, Małgorzata Szczeńniak czy Antoni Szczuciński, mówią o podmiotowej swoistości kosmologii: człowiek jest obserwatorem we Wszechświecie, który sam bada (Such, Szczeńniak, Szczuciński 2000). W sposób odrębny zostaną potraktowane osobliwości przedmiotu kosmologii oraz jej metod. Wybór takich a nie innych cech odrębności jest oczywiście kwestią subiektywną i wynika z własnych poglądów autorów, którzy, oprócz obiektywnej analizy metodo-

logiczno-filozoficznej, czynnie uprawiają dziedzinę kosmologii teoretycznej i obserwacyjnej. Wymieńmy kilka bardzo specyficznych problemów.

3. SWOISTOŚĆ ONTOLOGICZNA KOSMOLOGII

3.1 Swoistość przedmiotu badań – analogia archeologiczna

Rekonstrukcji ewolucji Wszechświata dokonujemy na podstawie obserwacji obiektów i zjawisk z nimi związanych, które zachodzą na różnych etapach ewolucji. Nowe metody i techniki obserwacyjne pozwalają nam sięgać w coraz odleglejsze obszary Wszechświata, analogicznie jak nowe znaleziska archeologiczne. Metody fizyki jądrowej (archeologia neutronowa) czy też odkrycia antropologiczne otwierają nam możliwości penetracji coraz odleglejszej przeszłości, kultury czy też rekonstrukcji ewolucji gatunku *homo sapiens*. O ile jednak muzeum archeologiczne jest miejscem, gdzie zobaczymy relikty naszej przeszłości, to w kosmologii takie muzeum reliktyw zawiera zdarzenia zlokalizowane w czasoprzestrzeni w naszym stożku przeszłości. Historyczny aspekt kosmologii, do którego będziemy nawiązywać w pracy, manifestuje się też na bardzo wiele różnych sposobów.

W fizyce i astronomii ważne są przede wszystkim predykcje (prognozy) z danego stanu układu odnośnie jego przyszłości, natomiast w kosmologii dokonujemy głównie retrodykcji (retroprognozy) w przeszłość na podstawie wiedzy danego nam stanu Wszechświata dzisiaj. Podstawą retrodykcji są deterministyczne prawa ewolucji Wszechświata, które z grubsza znamy. Następnie stawiamy hipotezę dotyczącą zjawiska, własności czy efektu, który mógł zaistnieć w przeszłości (jak to zrobił George Gamow przewidując teoretycznie istnienie we Wszechświecie promieniowania reliktyowego i wyznaczając teoretycznie jego temperaturę) i dopiero wówczas dokonujemy predykcji w przód do obecnego stanu. H. F. M. Goenner, parafrazując powiedzenie Friedricha Schlegela ujmuje to w trafny i sugestywny sposób: „kosmologowie są prorokami przeszłości” (Goenner 2010).⁴

W kosmologii retroprognoza jest realizowana przy pomocy modeli kosmologicznych, które są autonomicznymi narzędziami badawczymi do badania Wszechświata [Szydłowski 2010]. Na przykład, na podstawie modelu przewidujemy temperaturę historię Wszechświata, by dokonać retroprognozy faktu, że w przeszłości temperatura ta mogła osiągnąć wartość dostateczną do rozpoczęcia reakcji termojądrowych. Wtedy stawiamy hipotezę, że w przeszłości miał miejsce proces nukleosyntezy kosmicznej. Dokonujemy następnie na tej podstawie ekstrapolacji w przyszłość, tj. prognozy (jak w fizyce) na podstawie modelu nukleosyntezy. W efekcie uzyskujemy wynik

⁴ W istocie, biblijny prorok to nie jasnowidz, który widzi przyszłość, ale to ten, który interpretuje dany moment w historii jako znaczący i determinujący przyszłość.

mówiący, że rozpowszechnienie pierwiastków lekkich jest zgodne w retrognozie i prognozie. Jest to osobliwa predykcja, bo już na samym początku znamy stan końcowy z danych astronomicznych. W zasadzie tę procedurę powinno się nazywać uzgadnianiem stanu początkowego ze stanem obecnym. Jeśli takie uzgadnianie się powiedzie, znaczy to, dane zjawisko miało miejsce w przeszłej historii Wszechświata. W przypadku procesu nukleosyn-tezy wnioskujemy, że w przeszłej historii Wszechświat był gorący.

Innym ważnym aspektem odróżniającym kosmologię od standardowej fizyki jest fakt, że w tej pierwszej prognozy mają mniejszą pewność. Jakkolwiek bowiem dysponowalibyśmy powiedzmy, doskonałą teorią fizyczną i modelem Wszechświata dzisiaj, nie oznacza, że tak będzie zawsze w przyszłości. Nie możemy z modelu wydedukować wiarygodnego opisu przyszłej ewolucji Wszechświata, ponieważ nasza teoria nie może być przetestowana tak, jak ma to miejsce w fizyce. To, że obecny Wszechświat przyspiesza i jego stan świetnie opisuje standardowy model kosmologiczny (ciemnej zimnej materii LambdaCDM) nie oznacza, że mamy do czynienia z akceleracją wieczną. Rozsądny pogląd na ten temat wyraził Ellis:

„W różnych podręcznikach i monografiach z kosmologii we wstępach autorzy próbują w różny sposób określić z grubsza przedmiot zainteresowań kosmologii jako nauki fizycznej, której badania koncentrują się na wielkoskalowej strukturze i ewolucji Wszechświata, oraz poszukiwaniu złożonych procesów fizycznych w nim zachodzących w trakcie tej ewolucji. Pojęcie skal kosmologicznych, w których Wszechświat badamy, jest kluczowe” (Ellis 2007, s. 61).

Skale czasowe i przestrzenne w kosmologii są wytyczone przez aktualne możliwości obserwacyjne, natomiast ambicją kosmologów jest zbadać Wszechświat w największej możliwej dostępnej obserwacji skali. Stąd możliwości technologiczne kosmologii obserwacyjnej wyznaczają to, co jest przedmiotem naszych zainteresowań. Temporalność samej kosmologii byłaby zatem determinowana przez rozwój możliwości obserwacyjnych. Longair argumentuje, że technologie w kosmologii miały szczególne znaczenie dla wyodrębnienia się tzw. kosmologii astrofizycznej (Longair 2001). Wadą tej definicji jest uzależnienie przedmiotu kosmologii od naszych możliwości technologicznych i możliwości przyrządów obserwacyjnych. To sprawia, że przedmiot ten ma charakter temporalny, zrelatywizowany do obecnych możliwości obserwacyjnych Wszechświata. W próbie określenia przedmiotu kosmologii powinniśmy raczej wziąć pod uwagę, że niezależnie od wspomnianych obserwacyjnych ograniczeń związanych z postępem technologicznym mamy też ograniczenia związane z faktem istnienia horyzontu informacyjnego Wszechświata. Jest to fizyczną konsekwencją faktu, że prędkość światła jest maksymalną prędkością przekazu informacji od obiektu do obserwatora. Ponieważ Wszechświat ewoluje, to naturalnie rozmiar informacyjnie do-

stępnego Wszechświata też ewoluuje i zależy od przebiegu samego scenariusza ewolucyjnego.

3.2. Specyficzny problem warunków początkowych w kosmologii

W przypadku układów fizycznych, opisywanych przez równania fizyki, aby wyselekcjonować rozwiązanie fizyczne ze zbioru rozwiązań możliwych teoretycznie, należy zadać odpowiednie warunki początkowe oraz dodatkowo warunki brzegowe, gdy mamy do czynienia z równaniami różniczkowymi cząstkowymi. W przypadku standardowego modelu kosmologicznego, dzięki założonym symetriom przestrzennym (zasada kosmologiczna), równania dynamiczne sprowadzają się do równań różniczkowych zwyczajnych i mamy do czynienia jedynie z problemem warunków początkowych. W przypadku układów fizycznych, w których ewolucja jest opisywana przez równania różniczkowe zwyczajne, stopień ogólności rozwiązań jest mierzony liczbą dowolnych stałych w rozwiązaniu ogólnym.

Kosmologia wypracowała dwa sposoby radzenia sobie z niewiedzą o warunkach początkowych (warunkach brzegowych dla kosmologii kwantowej w ujęciu Hartle'ego-Hawkinga). Pierwsze rozwiązanie mówi, żeby te warunki pozostawić dowolne i pozwolić kosmologii obserwacyjnej na ich wyznaczenie. Obserwacje astronomiczne wybiorą nam pewną podklasę tych warunków początkowych, które będą prowadzić do dzisiaj obserwowanego Wszechświata.

Jeśli zgodzimy się, że standardowy model kosmologiczny jest adekwatnym opisem dzisiejszego Wszechświata, to równania ewolucyjne można zredukować do postaci równań różniczkowych pierwszego rzędu zwanych równaniami Friedmana. W równaniach tych niewiadomą jest pewna pojedyncza funkcja czasu kosmologicznego zwana czynnikiem skali. W równaniach występują również pewne stałe bezwymiarowe zwane parametrami gęstości. Wielkości te charakteryzują udział różnych postaci materii w jego materialnej zawartości (substracie). Są to ciemna nierelatywistyczna (dlatego zimna) materia, materia barionowa oraz ciemna energia (Fornengo 2017). Wartości tych parametrów należy estymować z dostępnych danych obserwacyjnych. Wówczas za daną początkową można przyjąć wartość stałej Hubble'a np. w dzisiejszej epoce (albo też ją oszacować z danych).

Kluczowym pytaniem, które można postawić w tym kontekście jest: czy obserwacje astronomiczne (nawet idealne) są w stanie zrekonstruować stan początkowy dla Wszechświata? Zasadne jest pytanie nie tylko, czy, ale też, w jakim stopniu są w stanie odróżnić, czy w przeszłości Wszechświat przeżywał osobliwość, czy też przeszedł przez nią w wysokoenergetycznej fazie odbicia. Co więcej, początkowy stan Wszechświata mógł być chaotyczny, jak przewidują to modelowe badania ewolucji zachowania Wszechświata w oto-

czeniu osobliwości początkowej. W konsekwencji mała zmiana warunków początkowych może być amplifikowana w trakcie ewolucji Wszechświata, i stąd utrudniać dojście do stanu dzisiejszego, a to jest warunkiem koniecznym poprawnej rekonstrukcji przeszłości.

Zwróćmy uwagę, że ewolucja Wszechświata opisywanego przez model standardowy LCDM jest ewolucją układu klasycznego. Warunki początkowe dla tej ewolucji powinny być wzięte z kosmologii kwantowej opisującej Wszechświat w skali Plancka 10^{33} cm. W kosmologii należałoby, chcąc być ścisłym, odróżnić kosmogenezę od samej kosmologii. Tak, jak kosmogonia ustala mechanizmy powstania układu słonecznego, będące potem punktem wyjścia dla jego badania, tak kosmogeneza powinna ustalić mechanizmy kwantowej ewolucji Wszechświata, będące punktem wyjścia dla jego ewolucji klasycznej. W ten sposób kosmogeneza kwantowa staje się automatycznie wciągnięta w obszar badań kosmologicznych.

Roger Penrose zaproponował próbę rozwiązania problemu warunków początkowych na gruncie czysto klasycznym bez odwoływania się do kosmologii kwantowej. Postawił on hipotezę, że warunkiem początkowym dla Wszechświata (rozumianego jako ewolucja czasoprzestrzeni) powinien być stan o niskiej wartości entropii (a więc maksymalnej informacji). Użył on tensora Weyla jako miary tej entropii i zażądał, aby ten zniknął w osobliwościach czasoprzestrzennych w przeszłości. W tym momencie w naturalny sposób narzuca się odniesienie do zasady szczególnego dostrojenia⁵.

Pomijając fakt statusu tzw. zasad antropicznych, główną motywacją dla ich formułowania wydaje się poszukiwanie warunków początkowych dla Wszechświata, by odpowiedzieć na pytanie, dlaczego on jest takim, jakim go dzisiaj obserwujemy.

Istnieje również inny sposób rozwiązania problemu warunków początkowych a w zasadzie uwolnienia się od nich: „wciśnięcie” w scenariusz ewolucyjny Wszechświata idei inflacji. Najogólniej rzecz biorąc, scenariusz inflacyjny zakłada istnienie w przeszłości (po epoce kwantowej) fazy bardzo szybkiej (ekspotencjalnej) ekspansji Wszechświata. Wszechświat w tej fazie niejako „zapomina” o swoich warunkach początkowych, stając się prawie płaski. Różne mechanizmy wygenerowania takiej fazy ekspansji zostały zaproponowane z uwzględnieniem pola skalarnego z potencjałem. W tych scenariuszach, chociaż ewolucja de Sitterowska jest osiągalna, istnieje problem szczególnego dostrojenia, tzn. scenariusze zależą od przyjętej formy potencjału, a my chcielibyśmy, aby stan inflacji był generyczny i niezależny od szczegółów – zasada indyferentyzmu (Szydłowski, Golbiak 2006).

Istnieje istotna tu *explicite* niesformułowanej zasady: adekwatny mechanizm fizyczny musi się charakteryzować brakiem wrażliwości na szczególne

⁵ Różne zasady tropiczne po raz pierwszy zostały sformułowane właśnie w tym kontekście [Carter, Demaret].

dostrojenia postulowanych przez elementów modelu. Za taką intuicją leży pogląd, że nasze modele są ułomne, a to oznacza, że powinny się charakteryzować brakiem wrażliwości ze względu na szczególne dostrojenia parametrów i innych szczegółów). Powinny być odporne na małe zmiany, chociażby z tego powodu, że dane, z którymi je konfrontujemy, są obciążone zawsze błędem. Czasem traktuje się modele jako niekoniecznie reprezentujące układ fizyczny, ale jako narzędzia testujące określone założenia rozwijanej teorii i/lub generujące określone hipotezy (*toy models*) (Luczak, 2016).⁶ Wiele modeli kosmologicznych pełni często właśnie taką funkcję.

Jeszcze inny sposób rozwiązania problemu warunków początkowych zaproponowali Hartle i Hawking w ich podejściu do kosmologii kwantowej. Opiera się ono na koncepcji funkcji falowej dla Wszechświata. Autorzy opierają się na formalizmie całek po trajektoriach i liczą tzw. propagator określający prawdopodobieństwo przejścia Wszechświata z jednej konfiguracji geometrii i pola skalarnego do innej konfiguracji. Hawking zaproponował, aby zadać warunki brzegowe w postaci rozmaitości bez brzegu. Wtedy istnieje skończone prawdopodobieństwo powstania Wszechświata z początkowej konfiguracji będącej punktem. Hawking niesłusznie nazywa ten stan początkowy stanem *ex-nihilo*, ponieważ jest to punkt przestrzeni, w którym określone jest pole skalarne; powiedzielibyśmy przez analogię do pojęcia punktu materialnego — punkt skalarny. Próba określenia tego stanu w kategoriach zbioru pustego przez McCabe'a jest również chybiona, bo nie jest obiekt teorii mnogościowy (McCabe, 2005).

3.3. Specyficzna rola zasad kosmologicznych

Model kosmologiczny składa się z dwóch warstw. Warstwa zewnętrzna jest określona przez model czasoprzestrzeni, który jest rozwiązaniem kosmologicznym einsteinowskich równań pola dla określonego źródła grawitacji. Ta czasoprzestrzeń staje się elementem absolutnym w kosmologii, gdzie postuluje się istnienie uniwersalnego czasu kosmologicznego i jego rozdział od przestrzeni. Czasoprzestrzeń modeli kosmologicznych posiada strukturę blokową, co matematycznie oznacza topologię przestrzeni produktowej $R \times M^3$, gdzie M^3 jest rozmaitością z metryką Riemanna. Czasami modelem kosmologicznym nazywa się wprost parę (M, g) zbudowaną z czterowymiarowej rozmaitości o strukturze Lorentza z zadaną na niej metryką g (Hawking, Ellis 1973). Wydaje się jednak, że dla kosmologii, która jest nauką typu ewolucyjnego, wyróżnienie czasu kosmologicznego (globalnego) jest kluczowe, jeśli traktować ją jako fizykę Wszechświata, ponieważ to w czasie kosmologicznym jest odmierzana ewolucja kosmiczna dzieląca się na epoki kosmologiczne.

⁶ Standardowy model kosmologiczny można też zaliczyć do kategorii *toy models*.

Równania Einsteina są niezwykle skomplikowanym układem nieliniowych równań różniczkowych cząstkowych rzędu drugiego. Znalezienie ich rozwiązań wymaga znajomości warunków brzegowych i warunków początkowych. Oczywiście tych warunków nie znamy *a priori*. Nie potrafimy też podać postaci tzw. ogólnego rozwiązania tych równań, nie tylko ze względu na stopień ich komplikacji i nieliniowość. Równania Einsteina nie opisują wyłącznie Wszechświata, ale też czarne dziury, gwiazdy relatywistyczne i inne obiekty astrofizyczne pozostające w obecności silnych pól grawitacyjnych. Jest to klasyczny przypadek niedookreśloności kosmologii i dlatego stosujemy pewne założenia idealizacyjne, aby zbliżyć się do przewyciężenia tej niedookreśloności.

Takim założeniem idealizacyjnym jest odwołanie się do zasady kosmologicznej (Rudnicki 2002). Istnieje wiele postaci zasady kosmologicznej. Einstein uogólnił zasadę kopernikańską o postulat, że średnie parametry Wszechświata takie jak gęstość materii, temperatura i inne własności fizyczne są jednakowe w obszarze kosmologicznym, dostatecznie dużym dla kosmologicznych uśrednień. Zasadę tę („Wszechświat jest z grubsza jednorodny i izotropowy przestrzennie”) zwykle się nazywało einsteinowską wersją uogólnionej kopernikańskiej zasady kosmologicznej.

Einstein uzasadniał użycie zasady kosmologicznej w sposób fizyczny: gdy interesuje nas wielkoskalowa struktura Wszechświata, możemy sobie wyobrazić, że materia rozmieszczona jest na niezmiernych obszarach równomiernie. Gęstość materii co prawda się zmienia, ale zmiany te są małe. Einstein swoją procedurę idealizacyjną traktował analogicznie do aproksymacji geoidalnego kształtu Ziemi przez elipsoidę (Rudnicki 2002). Prędkości gwiazd (świat Einsteina podobnie jak Newtona był zbudowany z gwiazd) są dużo mniejsze od prędkości światła, dlatego można założyć, że istnieje układ odniesienia (spoczynkowy), w którym materia pozostaje w spoczynku i nie zależy od zmiennych przestrzennych (jednorodność przestrzenna). Jeśli Wszechświat jest skończony, to założenie, że skalar gęstości nie zależy od punktu, było dla Einsteina naturalne.

Rudnicki ten sposób argumentacji nazywa prymitywnym. Utrzymuje, że sama intuicja była naiwna, świat mały, zamknięty wypełniony gwiazdami, w którym wzrok obserwatora przenika go dookoła. Intuicja Einsteina, chociaż błędna, wiodła go do poprawnego modelu; Einstein podtrzymywał swoje założenie, nawet gdy już było znane istnienie galaktyk i ich swoistych i kosmologicznych prędkości. Założenie jednorodności i izotropii było w istocie niezwykle restryktywne i dopuszczało tylko ruchy radialne z prędkością względną proporcjonalną do wzajemnej odległości. Dodatnia korelacja pomiędzy odległością galaktyk a przesunięciem ku czerwieni była, jak wiadomo, znana przed pomiarem Hubble’a pierwszych odległości do galaktyk.

Edwin Hubble był nie do końca świadomym odkrywcą prawa nazywanego jego nazwiskiem. Hubble w zależności przesunięć ku czerwieni od odle-

głości nie dopatrywał się żadnych głębszych regularności i poszukiwał de facto zależności wielomianowej krzywej regresji. Dopiero gdy zapoznał się z modelami relatywistycznymi, odrzucił człony wyższego rzędu, pozostawiając człon liniowy (Gates 1962)). Mamy tutaj doskonały przykład ilustrujący znane powiedzenie, że same obserwacje bez teorii są ślepe. Interesujący jest również fakt, że to z einsteinowskiej zasady kosmologicznej wynika bezpośrednio prawo Hubble'a. Czasem mylnie twierdzi się, że prawo liniowej zależności prędkości radialnych od odległości (czyli prawo Hubble'a) jest konsekwencją einsteinowskich równań dla grawitacji. Tak nie jest, ponieważ jest to naturalna konsekwencja przyjęcia założenia jednorodności i izotropii przestrzennej.

Oczywiście zasada kosmologiczna, przyjęta dla przewyciężenia problemu niedookreśloności kosmologii, może być w dalszych badaniach testowana obserwacyjnie. Może się bowiem okazać, że własność jednorodności i izotropii przysługuje tylko części naszego Wszechświata, natomiast poza tym obszarem Wszechświat jest niejednorodny i anizotropowy, tj. łamie tę zasadę (Junji Jia, Hogg Z, Zhang 2008). W tym kontekście interesujący jest program Charlesa Hellaby rekonstrukcji czasoprzestrzennej metryki z danych obserwacyjnych (Hui-Ching Lu, Hellaby 2007).

Rudnicki twierdzi, że istnieje w kosmologii metodologiczna konieczność użycia zasady kosmologicznej. Ta konieczność wynika ze specyfiki badań kosmologicznych, które odróżniają ją od innych dziedzin wiedzy, jak powiedzmy, fizyki czy chemii. Naszym zdaniem zasada kosmologiczna jest propozycją teoretyczną posiadającą uzasadnienie empiryczne. Jest nim przewyciężenie niedookreśloności kosmologii, która nie jest autonomiczna w tym sensie, że nie opiera się na teorii, która się do niej wyłącznie odnosi. Problem kosmologiczny jest jedynie dziedziną aplikacji równań Einsteina.

Michał Heller proponuje uprawianie tzw. wewnętrznej metodologii nauki. Problematykę zasad ekstrapolacji praw fizyki laboratoryjnej na cały Wszechświat zalicza on do obszaru zainteresowań tej właśnie metanauki (Heller, 1978). Obszar czasoprzestrzeni zawarty wewnątrz horyzontu cząstek Heller określa mianem Wszechświata będącego „obserwowalnym w zasadzie”, a miejsce zasady kosmologicznej widzi jako pewne dodatkowe założenie, gdy ekstrapolujemy naszą wiedzę fizyczną z obszaru rzeczywiście obserwowalnego. Zasadę kosmologiczną definiuje w sposób operacyjny: uśredniony obraz Wszechświata otrzymany przez obserwatora wyposażonego w standardowe instrumenty astronomiczne nie zależy od jego pozycji w przestrzeni. W tej definicji zasady kosmologicznej jest niedookreślone, co to są standardowe instrumenty kosmologiczne. Pojęcie standardowego instrumentu astronomicznego jest relatywne, dlatego może lepiej byłoby mówić o obserwatorze, który dysponuje danymi obserwacyjnymi uzyskanymi z dostępnych obserwacji astronomicznych naziemnych i eksperymentów i satelitarnych. Heller uważa, że koncepcja ekstrapolacji cały czas czeka na

poprawne metodologiczne opracowanie. Mówi się o ekstrapolacji fizyki ziemskiej czy lokalnej. Wszystkie znane nam prawa fizyki są ekstrapolowane na Wszechświat, będący przedmiotem kosmologii, chociaż nie wszystkie te prawa mają potwierdzenie w laboratoriach ziemskich. Przykładowo, w skali układu planetarnego poszukujemy potwierdzenia ogólnej teorii względności, ale jest to możliwe zaledwie w jej przybliżeniu liniowym. Stąd trudno jest uznać już OTW za fizykę ściśle ziemską czy też lokalną. Chyba lepiej jest mówić o znanej nam fizyce i jej ekstrapolacji na Wszechświat. Problem ekstrapolacji wymaga starannego potraktowania. Zauważmy, że gdy ekstrapolujemy znaną nam fizykę lepiej lub gorzej sprawdzoną w warunkach ziemskich laboratoriów, *implicite* zakładamy, że prawa fizyki w dowolnym fragmencie przestrzeni są identyczne. Jest to rodzaj założenia natury filozoficznej, konsekwencją przyjęcia zasady fizycznej jedności świata. Czyli rozwiązanie zagadnienia kosmologicznego zakłada wcześniejsze poznanie praw fizyki. Nasza niewiedza tym względnie obciąża kosmologię jako taką, której program badawczy jest ściśle uzależniony od znanej nam fizyki.

Ofer Lahav dokonał obserwacyjnych testów zasady kosmologicznej (Lahav 2000). Przeglądy redshiftów, ruchów własnych, radioźródeł, tła promieniowania rentgenowskiego, obserwacje CMB, linii neutralnego wodoru itp. ograniczają wielkość niejednorodności, a w szczególności fraktalną strukturę wielkoskalowego rozkładu materii. Gdyby zasada kosmologiczna (einsteinowska) nie była spełniona, to, zdaniem Lahava, miałyby to poważne konsekwencje dla interpretacji wieku Wszechświata, jego geometrii i jego materialnej zawartości. Lahav twierdzi, że gdy zasada kosmologiczna została zastosowana w kosmologii obserwacyjnej w jej okresie „niemowlęcym”, pełniła wtedy rolę hipotezy (*conjecture*), była rodzajem brzytwy Ockhama dla uzyskania prostych modeli kosmologicznych. Dzisiaj posiadamy pełną kontrolę adekwatności tej zasady idealizacyjnej do Wszechświata. Ehlers, Geren i Sachs (1968) pokazali, że łącząc zasadę kopernikańską z izotropią promieniowania relikтового możemy wydedukować jednorodność.

4. EPISTEMOLOGICZNA SWOISTOŚĆ KOSMOLOGII

4.1. Rola obserwatora i problem horyzontu

Rudnicki tak charakteryzuje kosmologię i jej odrębność od astronomii:

„Do astronomii należy obserwować, co jest obserwowalne bezpośrednio i pośrednio I wyjaśnienie tego przy pomocy innych obszarów wiedzy. Dziś głównie przy pomocy matematyki, fizyki i chemii. Kosmologia różni się od astronomii w tym, że chce twierdzić coś naukowo o całym Wszechświecie. Wszechświat może być skończony i dostępny obserwacyjnie (bezpośrednio

lub pośrednio) w każdym miejscu i w każdym momencie czasu co najmniej w przeszłości lub mogą istnieć liczne jego obszary przestrzeni i/lub epoki czasu, dla których nie możemy uzyskać żadnej ewidencji z obserwacji. W tym drugim przypadku jednakże kosmologia musi jakoś poradzić się z »wypełnieniem« tych obszarów czasoprzestrzeni, które są niedostępne obserwacyjnie” (Rudnicki, 1989).

Epistemologiczną swoistością kosmologii jest z pewnością fakt, że obserwator jest częścią obiektu, który sam bada. Jest on zdany na poznawanie wszechświata na podstawie docierających do niego sygnałów, ale może również planować obserwacje, decydować, jakie dane i skąd do niego będą docierać. Jesteśmy zdani na poznawanie Wszechświata na podstawie docierających do nas sygnałów ze skończoną prędkością, czyli jesteśmy ekranowani przez horyzont kosmologiczny (Ellis 1993; Rindler 1956; Ellis, Steger 1998). Pojęcie horyzontu jest ściśle związane z pojęciem obserwatora. Horyzont informacyjny jest ogólniejszy od horyzontu zdarzeń, ponieważ w jego określeniu wykorzystujemy jedynie fakt, że prędkość światła jest maksymalną prędkością przekazu informacji, a nie jest prędkością fotonu. To, co przenosi informację w obszarze horyzontu, jest rzeczą umowną, ale fotony reliktowe nie rozchodzą się przed epoką rekombinacji, czyli horyzont cząstek jest zerowy przed epoką rekombinacji. Gdy fotony mogą się swobodnie propagować, to jest spełniony warunek przekazu informacji. Wcześniej pojęcie horyzontu dźwięku będzie miało sens, ponieważ wtedy materia istnieje w postaci plazmy fizycznej, równanie stanu posiada postać jak dla materii promienistej i dźwięk porusza się w niej z prędkością $\sqrt{3}/3$ mniejszą od c . Stąd jego prędkość możemy użyć do definicji horyzontu, który jedynie posiada sens fizyczny. Widzimy więc, że pojęciu horyzontu w kosmologii zawsze nadajemy sens operacyjny i relatywizujemy go do konkretnej epoki.

Istnienie horyzontów w kosmologii jest naturalną konsekwencją faktu, że wszelka informacja musi dotrzeć do obserwatora zanim zostanie przez niego zarejestrowana. Rozmiary horyzontu jednak zależą od czasu kosmologicznego (Margalef-Bentabol, Margalef-Bentabol, Ceba, 2012). Można, jak to zobaczymy później, podać ogólną formułę, która uzależnia rozmiar horyzontu informacyjnego od konkretnego scenariusza ewolucyjnego. Rozmiar horyzontu jest z grubsza proporcjonalny do promienia Hubble’a $R_H=1/H$, natomiast rozmiary fizyczne obiektu są proporcjonalne do czynnika skali. Zdarzenia znajdujące się wewnątrz horyzontu będą podlegać związkowi przyczynowemu, ale sytuacja jest dynamiczna, ponieważ obszary układu, które nie podlegają związkowi przyczynowemu (podhoryzontalne), mogą w przyszłości mu już podlegać. Potrafimy ten proces teoretycznie cały czas kontrolować, bo mamy odpowiednią teorię.

Radykalni empiryści uznają obiekty znajdujące się pod horyzontem za nieistniejące jako nieobserwowalne. Niemniej jednak istnieją one fizycznie

również pod horyzontem, jeśli założymy, że prawa fizyki stosują się do całego Wszechświata, ponad i pod horyzontem. Mówi o tym tzw. zasada jedności świata, według której prawa fizyki obowiązują w każdym miejscu Wszechświata.

Przedmiotu kosmologii nie ograniczamy wyłącznie do obszaru wewnątrz horyzontu. Istnienie horyzontu (granicy) dla kosmologii obserwacyjnej nie może być ograniczeniem dla samej kosmologii. Co więcej, istnieje związek przyczynowy pomiędzy zaburzeniami poza-horyzontalnymi i tymi znajdującymi się ponad horyzontem, który potrafimy kontrolować przy pomocy teorii.

Wyobraźmy sobie że interesuje nas zaburzenie o pewnej długości fali. Jeśli długość fali pewnego zaburzenia przekroczy rozmiar horyzontu, wówczas kosmologowie powiadają w swoim żargonie, że fala zamarza, ponieważ przestaje ona ewoluować. Nazwa jest całkiem uzasadniona, ponieważ w tym przypadku ustają wzajemne oddziaływania podukładów (jeśli zamarza woda, to nie mogą się w niej rozchodzić fale powierzchniowe). Pamiętajmy jednak, że cały czas fala o długości pod-horyzontalnej podlega równaniu falowemu. Ona istnieje realnie w sensie fizycznym, chociaż w danej chwili nie może być pozyskana informacja o jej istnieniu.

Krauss i Scherrer (2007) badali, jak zmienia się horyzont w przyspieszającym wszechświecie i ekstrapolowali obserwowalną fazę przyspieszonej ekspansji w odległą przyszłość. Ponieważ rozmiary fizyczne obiektu rosną proporcjonalnie do czynnika skali, a rozmiary horyzontu maleją z jego wzrostem, to pewne obserwacje obiektów mogą stać się dla nas niepowtarzalne, i kiedyś w dalekiej przyszłości Droga Mleczna schowa się poza horyzontem stając się nieobserwowalną. Takie rozumowanie autorów jest daleko idącą ekstrapolacją fazy akceleracji na odległą przyszłość Wszechświata; ekstrapolacja ta nie musi być poprawna. Już w przeszłości Wszechświat przyspieszał w fazie inflacji, a potem zaczął wyhamować w fazie dominacji materii. Fakt, że, jak wyrażają się autorzy, Wszechświat zmienia „pole widzenia”, nie może być interpretowany epistemologicznie jako ograniczenie naszych zdolności poznawczych w kosmologii sugerujące apokaliptyczny koniec wiedzy kosmologicznej. Zagadnienie dyskusji zmiany horyzontu w skalach ludzkich wydaje się być zagadnieniem czysto akademickim, dopóki nie ma świadectwa wiecznej akceleracji Wszechświata. Poza tym wpływ tych zmian horyzontu na procesy zachodzące we Wszechświecie jest zaniedbywalny. Dzisiaj Wszechświat przyspiesza, ale jego przyszła ewolucja nie jest nam znana.

Inne ograniczenie, które można interpretować epistemologicznie, może implikować problem tzw. kosmicznej wariacji związany ze statystyczną niepewnością w analizie wyników obserwacji Wszechświata o skalach kosmologicznych. W kosmologii możliwa do poznania jest tylko część Wszechświata w szczególnym czasie, ponieważ istnieją ograniczenia w statystycznej interpretacji danych obserwacyjnych w obszarze interesującym dla kosmo-

logii (Somerville et al. 2004; Keremediew 2006). Problem kosmicznej wariacji jest niezwykle ważki z punktu widzenia metodologii kosmologii, dlatego poświęćmy mu uwagę.

Załóżmy, że interesujący nas proces fizyczny ma miejsce na skalach mniejszych i większych od horyzontalnych i ma charakter losowy. Wówczas proces fizyczny, jak na przykład amplituda pierwotnych perturbacji, mający miejsce w skali horyzontalnej, daje nam tylko jedną fizyczną obserwowalną realizację. Proces fizyczny o skalach większych niż horyzontalne daje nam natomiast zerową liczbę realizacji, a procesy fizyczne o małych skalach dadzą nam większą liczbę realizacji. W konsekwencji, gdy mamy tylko jedną realizację, trudno jest wyciągać z niej wnioski statystyczne odnoszące się do znaczenia dla modelu procesu fizycznego. Dobrym przykładem tego faktu są obserwacje promieniowania mikrofalowego tła (CMB).

Ograniczony dostęp do informacji ma dwa źródła. Po pierwsze, znajdujemy się w określonym miejscu w przestrzeni i jesteśmy zdani tylko na zbieranie danych, które do nas docierają. Po drugie prędkość przekazu informacji jest ograniczona, co ogranicza obszar z jakiego może być ona do nas przekazana. O jaką informację chodzi i skąd ona pochodzi? Mianowicie chodzi o informację o postaci kontrastu zaburzeń w danym miejscu przestrzeni w określonej chwili czasu. Czyli to, co nam jest potrzebne, aby wyznaczyć postać korelatora. W szczególności, informacja ta została „uwieczniona” w fotonach mikrofalowego promieniowania tła (CMB) podczas fazy rekombinacji. Energie tych fotonów różnią się w zależności od tego, czy powstały w obszarze zagęszczenia czy rozrzedzenia materii (efekt Sachs-Wolfe’a).

Weźmy dowolny punkt w przestrzeni, taki który np. odpowiada naszej obecnej lokalizacji. Po rekombinacji do punktu tego zaczęły przybywać fotony z coraz to odleglejszych obszarów, niosąc informację o postaci zaburzeń. Niestety ta informacja nie była zbierana, dopóki promieniowanie mikrofalowe tła nie zostało odkryte. To, co mamy do dyspozycji dzisiaj, to fotony CMB pochodzące ze sfery o promieniu 14 Gpc, w której środku się znajdujemy. Sferę tą nazywamy powłoką ostatniego rozproszenia. Mierzac temperaturę promieniowania w zależności od kierunku na niebie, dowiadujemy się o wartości kontrastu zaburzeń w danym punkcie na powłoce ostatniego rozproszenia. To jest cała informacja, którą dysponujemy. Zamiast możliwości wykonywania pomiarów w całej przestrzeni, mamy do dyspozycji tylko powierzchnię sferyczną o określonym promieniu.

Jak łatwo zauważyć, sfera zawiera najwięcej informacji o postaci zaburzeń w skalach dużo mniejszych w porównaniu z promieniem sfery. Dla tych małych skal mamy dużą statystykę potrzebną do estymacji funkcji korelacji. Warto podkreślić, że taka estymacja jest możliwa ze względu na gaussowski charakter zaburzeń. Nie byłaby możliwa (lub byłoby to znacznie trudniejsze) dla pól niegaussowskich. Zwiększając skalę, ta statystyka ulega zmniejszeniu, za czym idzie większa niepewność estymowanego korelatora. Ostatecz-

nie nie da się nic powiedzieć o funkcji korelacji na skalach większych niż średnica sfery. Tą niepewność wyznaczania korelatora, wynikającą z ograniczenia związanego z naszym szczególnym usytuowaniem w przestrzeni, nazywamy kosmiczną wariancją. Jest ona tym większa, im większe skale rozpatrujemy.

Reasumując, kosmiczna wariancja oznacza, że możliwość estymowania parametrów w kosmologii jest ograniczona przez dostęp do informacji, które docierają do nas z powierzchni ostatniego rozproszenia. Aby określić rozkład fluktuacji promieniowania relikтового w całej przestrzeni, niezbędne jest wykonanie obserwacji z innych położeń, którym będą odpowiadały inne sfery ostatniego rozproszenia. Obserwacje CMB dotyczą Wszechświata w fazie ewolucji odpowiadającej redshiftowi $z = 1100$ (w którym miało miejsce rozprężenie fotonów), gdzie miało miejsce rozprężenie neutrin, które również niosą informację i będą definiować też powierzchnię ostatniego rozproszenia neutrin (niestety neutrina słabo oddziałują z materią). Jeszcze wcześniej fale grawitacyjne niosą informację o Wszechświecie, która odciska swoje piętno na CMB.

4.2. Dopuszczalność spekulatywnych wyjaśnień (kategoria wieloświata)

Analiza kategorii wieloświata angażuje trzy obszary badań: ontologiczny, epistemologiczny i metodologiczny. Umieszczamy tę analizę w części traktującej o swoistości epistemologicznej dość arbitralnie, głównie dlatego, że kategoria wieloświata ma swoje korzenie w tzw. problemie antropicznym.

Prezentując powyżej różne rozumienia odniesień modeli kosmologicznych, pozostawiamy przedmiot kosmologii źle zdefiniowany. Jesteśmy bowiem przekonani, że gdy lepiej zrozumiemy Wszechświat, stanie się możliwe podanie adekwatniejszej definicji. Obecnie musimy zadowolić się przybliżoną definicją opisową Wszechświata jako układu fizycznego, do którego stosują się znane nam prawa fizyki. Brak adekwatnej definicji wydaje się być źródłem obserwowanej obecnie erozji samego pojęcia „Wszechświat”. Mamy tutaj na myśli fakt, że dawniej kosmologowie byli głęboko przekonani, że przedmiot ich badań jest jednostkowy, a przez to niepowtarzalny i wyjątkowy. Ta wiara została zachwiana przez ostatnio popularne koncepcje wieloświata (*multiverse*), które pojawiły się w teorii superstrun i w M-theory (*brane universe*). Teoria superstrun postuluje istnienie 10^{500} tzw. stanów próżni (wszechświatów). Z każdego stanu próżniowego rodzi się z pewnym prawdopodobieństwem wszechświat. Roger Penrose oszacował, że nasz Wszechświat o energii 10^{16} GeV mógł powstać z prawdopodobieństwem (10^{-10}) .¹²³

Mówiąc o hipotezie wielu wszechświatów, należy odróżnić wieloświat od *ensemble'a* wszechświatów. *Ensemble* wszechświatów jest zbiorem wszech-

światów kauzalnie niepowiązanych (Ellis, Uzan 2015). Z kolei wieloświat jest zbiorem wszechświatów, które łączy wspólny mechanizm powstania. Wszechświaty – elementy wieloświata – zostały wygenerowane z pewnej leżącej u podstaw teorii, np. z teorii strun albo w scenariuszu chaotycznej inflacji Lindego, gdzie wszechświaty, jak bańki, bifurkują jedna z drugiej w różnych obszarach wieloświata (Tegmark 2004). Naszym zdaniem kwestia – jeden wszechświat czy wieloświat – jest czysto semantyczna. Możemy patrzeć na wieloświat jako na jeden obiekt – wszechświat – o bardziej złożonej strukturze.

O wieloświecie możemy również mówić w kontekście czasoprzestrzeni z czterema bądź więcej wymiarami przestrzennymi. W schemacie pojęciowym kosmologii branowej, w której 3-wymiarowa przestrzeń jest zanurzona w pewnej wyżej wymiarowej przestrzeni *bulk*, do której dodajemy wymiar czasowy. Grawitacja może odgrywać rolę w przestrzeni *bulk*, ale już pozostałe oddziaływania fundamentalne są uwiązane w branie. Dodatkowe wymiary przestrzenne, których istnienie postulujemy, mogą być zwarte, bądź nie, ale są one duże w odróżnieniu od planckowskich, jak w teorii Kaluzy-Kleina. Wieloświat może także zawierać nieskończoną liczbę replik tego samego wszechświata, jak ma to miejsce w wieloświatowej interpretacji mechaniki kwantowej Everetta.

Ciekawy pogląd na temat źródeł powstania koncepcji wieloświata wyraził Goenner (2010). Upatruje ich on w trudnościach rozwiązania pewnych problemów filozoficznych zawartych w tej koncepcji. Źródłami tymi są dążenie do pozbycia się osobliwości początkowej oraz próba powrotnego uzyskania biosfery w rzeczywistości Wszechświata (zasady antropiczne). We wczesnych etapach rozwoju kosmologii jako samodzielnej dyscypliny naukowej była ona traktowana jako pewien dział stosowanej teorii grawitacji (Kantscheider 1985). Einsteinowskie równania pola obok innych rozwiązań dopuszczały rozwiązania kosmologiczne. Do tej pory w kręgu kosmologów kwantowych kosmologia jest postrzegana jako *case study* kwantowej teorii grawitacji – pole do testowania koncepcji kwantowej grawitacji (Bojowald 2015). W tych badaniach kosmologię traktuje się jako dziedzinę nie fundamentalną, a fenomenologiczną. Fundamentalna jest teoria kwantowej grawitacji. Wszechświat kwantowy, w którym faza *bounce* zastępuje osobliwość, staje się modelem kwantowej teorii grawitacji.

Wspomniana erozja terminu „wszechświat” w związku z powstaniem koncepcji wieloświata świadczy o pojawianiu się spekulacji, gdy brak dobrej definicji przedmiotu badań. Podobna sytuacja ma miejsce w teorii superstrun, która, zamiast wyjaśnić koincydencje standardowego modelu Wszechświata – co powinna uczynić, bo inaczej łamie reguły metodologiczne obowiązujące w fizyce (Staruszkiewicz 2009) – powołuje koncepcję wieloświata. Co więcej proponowana jest karykaturalna koncepcja wyjaśnienia Wszechświata, wyjaśnienia wszystkiego przez wszystko. Martin Rees uważa,

że problem *multiverse* jest czysto semantyczny, bo to, co teraz nazywamy Wszechświatem można nazwać metagalaktyką, a *multiverse* nazwać Wszechświatem (Rees 2007). Taka postawa zdaniem Goennera, ukrywa zmianę ontologiczną, bo zakłada, że Wszechświat istnieje w takim samym sensie, jak, powiedzmy, układ słoneczny.

Ogólnie, pojęcie wieloświata rodzi pytanie o interpretację wieloświatowej interpretacji mechaniki kwantowej: czy wieloświaty mogą być traktowane jako realnie istniejące wszechświaty (realizm), czy też są to czysto myślowe konstrukty (antyrealizm, „teoretyczne teorie”)? Jaki jest ontyczny status wieloświatów? Niektórzy badacze, jak DeWitt, opowiadają się za uznaniem realności *multiverse*. De Witt prowokacyjnie pyta o różnicę między rzeczami realnymi fizycznie, a abstrakcjami takimi jak liczby, trójkąty (DeWitt 1967, Gardner 2003). Podążając tym tropem, twierdzi się, że wprowadzenie koncepcji *multiverse* prowadzi do rozszerzenia zasady kopernikańskiej: wszechświat nie jest centrum świata (rozumianego jako wieloświat). Oczywiście, wszechświat musi być czymś absolutnie wyjątkowym, ale trudno jest twierdzić, żeby wszystko logicznie dopuszczalne lub pomyślane miało być w świecie realizowane.

Wyważony pogląd na temat wieloświata wyraża Ellis (2007). Jego zdaniem przyjęcie realistycznej interpretacji wieloświata prowadzi do trudnego zadania powiązania go z relewantnymi danymi empirycznymi. Wszechświaty, które są przyczynowo rozłączne, pozostają poza kontrolą obserwacyjną i należy je uznać za obiekty niefalsyfikowane. Twardym rdzeniem prób zdefiniowania przedmiotu kosmologii jest traktowanie Wszechświata jako obiektu fizycznego.

W filozoficznej dyskusji nad pojęciem wieloświata pojawia się zatem pytanie o falsyfikowalność. S. Carroll podważa stosowalność kryterium falsyfikowalności dla subtelnych teorii fizycznych, w których ostrożnie konstruuje się empiryczne konsekwencje⁷. Wskazuje dwa inne kryteria naukowości teorii: teoria powinna być określona oraz empiryczna. Teoria określona (skończona) powinna zawierać jednoznaczne twierdzenia dotyczące rzeczywistości. Teoria empiryczna w tym ujęciu to nie teoria zdatna do formułowania testowalnych/falsyfikowalnych predykcji. Empiryczność teorii poznajemy po tym, jak radzi sobie z danymi empirycznymi. A zatem pewne założenia nawet ontologiczne, które dokonujemy w ramach teorii, nie muszą być testowalne, natomiast uwzględnienie ich w procesie wnioskowania (wyjaśniania) znaczenie wpływa na jego efektywność.

Oczywiście możemy nigdy nie mieć dostępu obserwacyjnego do innych światów wieloświata niż nasz Wszechświat, natomiast postulowanie istnienia wieloświata pozwala na zupełnie inne radzenie sobie z danymi, do

⁷ Zob. dyskusję w serwisie www.edge.org na temat „What scientific idea is ready for retirement?": <https://www.edge.org/response-detail/25322>. Podobnie o potrzebie korekty kryteriów falsyfikowalności w sensie klasycznym – popperowskim pisze Kragh (Kragh 2015).

których mamy dostęp. Niezwykle ciekawie rozwija tę intuicję L. A. Barnes (Barnes 2017), posługując się logiką bayesowską. Otóż, traktuje on kategorię wieloświata jako przykład wyjaśniania typu „populacja + efekt selekcji”. Mamy do czynienia z mało prawdopodobnymi wartościami pewnych parametrów fizycznych. Postulujemy zatem istnienie większej i bardziej złożonej populacji (wieloświata), by wyjaśnić, dlaczego te wartości parametrów w ogóle istnieją, oraz pewien mechanizm selekcji, który wyjaśni, dlaczego te parametry w ogóle obserwujemy. Ten metodologiczny zabieg, który pozwala na badanie możliwych rozszerzeń danej teorii, stosuje się jako użyteczną spekulację w sytuacji, gdy aktualne dane nie dają podstaw by wyjść poza model standardowy (Heavens et al. 2017).

5. ZAKOŃCZENIE

– KOSMOLOGIA JAKO NAUKA NIEDOOKREŚLONA

Nasza praca pokazuje, że ma rację Uzan, kiedy pisze, że kosmologia współczesna odgrywa centralną rolę w debacie między światem nauk (*science*) a filozofią (Uzan 2014). Po pierwsze dlatego, że w szczególności dostarcza opisu historii ewolucji tego, co fizyczne we Wszechświecie; po drugie, ponieważ rekonstruuje historię Wszechświata jako całości (por. Weinberg 2015; Zinkernagel 2014).

Paradygmat kosmologii współczesnej głosi, że jest ona wtórna wobec fizyki, będąc specyficzną dyscypliną fizyczną. W tym miejscu trzeba jednak wspomnieć projekt Milne’a zbudowania kosmologii opartej na pierwszych zasadach dotyczących pomiaru czasu i przestrzeni, i stąd wyprowadzenia fizyki lokalnej (Dąbek, 2011). Niekoniecznie trzeba zarzucać fizykę znaną od Galileusza, a wręcz odwrotnie – można skorzystać ze współczesnej wiedzy o naturze czasu i przestrzeni. Naszym zdaniem na przykład teoria zbiorów kauzalnych Sorkina (Ling 2017) powinna być podstawą dla współczesnego projektu budowy kosmologii dedukcyjnej opartej nie na pomiarze relatywistycznym, ale kwantowym. Taki projekt zbliżyłby kosmologię do filozofii Leibniza z jego relacjonistyczną koncepcją czasu (Szydłowski, Tambor 2017).

W praktyce badawczej kosmologii można spotkać się z niedookreślonością kosmologii na różnych poziomach badań (Butterfield 2014). Rozwój kosmologii jest w pewnym wymiarze podporządkowany dążeniu do przewycięzania tej niedookreśloności. Problem niedookreśloności kosmologii należy odróżnić od problemu degeneracji, który pojawia się w kosmologii obserwacyjnej. Problem ten można ogólnie scharakteryzować jako zgodność alternatywnych modeli kosmologicznych z naszymi ewidencjami Wszechświata. Trafniej byłoby nazwać ten problem problemem degeneracji w kosmologii. Z kolei brak naszej wiedzy o Wszechświecie i o jego globalnych własnościach zmusza nas do zastosowania szczególnej strategii działania.

Przyjęcie zasady kosmologicznej jest bardzo restryktywnym założeniem prowadzącym do wyróżnienia wąskiej klasy modeli kosmologicznych o prostej blokowej strukturze czasoprzestrzeni z wyróżnionym czasem kosmologicznym. Zasada kosmologiczna sprawia, że możemy wypracować prosty model, który ekstrapolujemy na duże, często obserwacyjnie niedostępne obszary. W naszych laboratoriach ziemskich nigdy nie osiągniemy energii planckowskich, ale chcemy ekstrapolować naszą wiedzę do tego obszaru, by dyskutować zagadnienie osobliwości Wszechświata. Jej przyjęcie oznacza, że problem kosmologiczny staje się zasadnym. Beisbart pisze:

“If cosmology is to obtain knowledge about the whole universe, it faces an underdetermination problem: Alternative space-time models are compatible with our evidence. The problem can be avoided though, if there are good reasons to adopt the Cosmological Principle (CP), because, assuming the principle, one can confine oneself to the small class of homogeneous and isotropic space-time models” (Beisbart 2009, s. 175).

I zastanawia się, jakie są dobre uzasadnienia dla przyjęcia zasady kosmologicznej i przewyciężenia niedookreśloności modelu w kosmologii.⁸

Beisbart rozważa różne strategie usprawiedliwiające przyjęcie zasady kosmologicznej. Otwartym pytaniem jest, czy modele kosmologiczne są generyczne w klasie modeli ogólniejszych, w których odchodzimy od tej zasady. Jest to ważne dla poprawności wyjaśniania na podstawie tego uproszczonego modelu. W kosmologii zasadą metodologiczną stosowaną w praktyce badawczej uczonych jest tzw. zasada indyferentyzmu, zgodnie z którą istnieje pewien zbiór warunków początkowych prowadzących do tego samego stanu Wszechświata, obserwowanego dzisiaj (Szydłowski, Golbiak 2006).

W analizach metodologicznych dotyczących kosmologii można rozpatrywać role czynników empirycznych i teoretycznych w jej rozwoju. Odkrycie promieniowania relikтового jest świadectwem jej poważnego traktowania jako dyscypliny fizycznej. Tę sytuację dobrze oddaje następujący fragment:

“The story of the CMB origin offers insights into the nature of the progress of modern science — its good and bad points alike. The role of the empirical but unexpected discovery of the CMB as unravelling the deepest mysteries of the origin of the universe was immediately and widely recognized by almost the entire cosmological community, including most researchers with unorthodox views. In general, it helped persuade a large portion of the wider scientific community that cosmology is a serious, mature and firmly founded scientific discipline” (Cirkovic, Perovic 2017).

⁸ Co to znaczy, że każdy model wszechświata jest empirycznie niedookreślony? To znaczy, że żadna potencjalnie dostępna ilość danych nie wystarczy do tego, by wyselekcjonować dokładnie jeden model. Ponadto wniosek ten pozostaje w mocy nawet wtedy, jeśli założymy, że prawa fizyki działają nie tylko lokalnie, ale w całym Wszechświecie (zasada jedności, *principle of uniformity*).

Bez nieprzewidywanych odkryć natury empirycznej nie można zatem zrozumieć obecnego stanu wiedzy o Wszechświecie.

W pracy staraliśmy się scharakteryzować odrębność epistemologiczną i ontologiczną kosmologii, rozumianej jako fizyka Wszechświata, od samej fizyki. Próba zrozumienia tej odrębności jest de facto próbą zrozumienia samego projektu kosmologicznego, jak i tego, co kosmologowie chcą osiągnąć, jakie sobie stawiają cele i jakimi metodami je osiągają. W zasadzie zachowują się oni w swych badaniach jak fizycy, ale ich przedmiot badań jest wyjątkowy, unikalny i stąd stosowane metody są z natury specyficzne. Współczesna kosmologia jest nauką empiryczną, chociaż jeszcze 25 lat temu trudno to było dostrzec. Próba zdefiniowania kosmologii nie jest jej samej potrzebna, ponieważ jest to cały czas nauka otwarta na znaną i nieznaną fizykę. Cóż z tego, że podamy taką bądź inną definicję kosmologii, skoro ona nie odda jej wewnętrznej złożoności? Zawsze odnajdziemy jakiś jej aspekt, który pominęliśmy. Próba podania ścisłej definicji jej przedmiotu badań i metod kłóci się z zasadą jej otwartości na całą fizykę i osiągnięcia astronomii oraz astrofizyki. Stąd najlepiej mówić o niej w kategoriach metasystemowych, pokazując jej różnorodność i bogactwo. Pozwoli nam to lepiej rozumieć, co naprawdę robią kosmolodzy i co chcą osiągnąć.

W jednej z ostatnich prac T. Padmanabhan (T. Padmanabhan, H. Padmanabhan 2017) proponuje, aby projekt kosmologiczny konstrukcji modelu kosmologicznego przemyśleć na nowo, ponieważ kosmologia to taka nauka, o której do końca nie wiemy, jaką ma być, jaką fizykę ma obejmować, jakimi pojęciami mamy opisywać Wszechświat. Jest nauką, którą nie możemy zredukować do fizyki i wszelkie próby jej holistycznego traktowania są mile widziane. T. Padmanabhan i H. Padmanabhan proponują do modelu kosmologicznego wprowadzić kategorię informacji (CosmIn) i wyjaśniać problem stałej kosmologicznej, zagadkę przyspieszonej ekspansji Wszechświata, wielkoskalową strukturę Wszechświata w kategoriach tego pojęcia. Jest to otwarcie się kosmologii na teorię informacji. Nie ma w tym nic dziwnego, jeśli sobie uświadomimy, że pojęcie informacji jest kategorią fizyczną.

BIBLIOGRAFIA

- J. Bain, *Emergence in Effective Field Theories*, European Journal for Philosophy of Science, 2009, 3 (3), 2013, s. 257–273.
- L. A. Barnes, *Testing the Multiverse: Bayes, Fine-Tuning and Typicality*, arXiv:1704.01680, 2017.
- J. Baryszew, P. Teerikorpi, *Wszechświat. Poznawanie kosmicznego ładu*, WAM, Kraków 2005.
- C. Beisbart, *Can We Justifiably Assume the Cosmological Principle in Order to Break Model Underdetermination in Cosmology?*, Journal for General Philosophy of Science, 2009, 40 (2), s. 175–205.
- H. Bondi, *Cosmology*, Cambridge University Press, Cambridge 1960.
- M. Bojowald, *(Loop) Quantum gravity and the Inflationary Scenario*, Comptes Rendus – Physique, 2015, 16, s. 1012–1017.
- J. Butterfield, *On Under-determination in Cosmology*, Studies in History and Philosophy of Modern Physics, 2014, 46, s. 57–69.

- E. Castellani, *Reductionism, Emergence, and Effective Field Theories*, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2002, 33, s. 251–267.
- N. Cartwright, T. Shomar, M. Suarez, *The Tool Box of Science*, w: *Theories and Models in Scientific Processes*, W. Herfel, W. Krajewski, I. Niiniluoto i R. Wójcicki (red.), Rodopi, Amsterdam 1995, s. 149–173.
- M. M. Cirkovic, S. Perovic, *Alternative Explanations of the Cosmic Microwave Background: A Historical and an Epistemological Perspective*, arXiv:1705.07721, 2017.
- D. Dąbek, *Kosmologia Edwarda Arthura Milne’a i jej filozoficzne implikacje*, Wydawnictwo KUL, Lublin 2011.
- G. F. R. Ellis, T. Rothman, *Lost Horizon*, *American Journal of Physics*, 1993, 61 (10), s. 883–893.
- J. Ehlers, P. Geren, R. K. Sachs, *Isotropic Solutions of the Einstein-Liouville Equations*, *Journal of Mathematical Physics*, 1968, 9, s. 1344–1349.
- G. F. R. Ellis, W. Stoeger, *Horizons in Inflationary Universes*, *Classical and Quantum Gravity*, 1988, 5, s. 207–220.
- G. F. R. Ellis, *Before the Beginning: Emerging Questions and Uncertainties*, *Astrophysics & Space Science*, 1999, 269–270, s. 693–720.
- _____, *Physics in the Real Universe: Time and Space-Time*, w: *Relativity and Dimensionality of the World*, V. Petkov (red.), Springer, Dordrecht 2006, s. 79–94.
- G. F. R. Ellis, J.-Ph. Uzan, *Causal Structures in Inflation*, *Comptes Rendus Physique*, 2015, 16, s. 929–947.
- D. Figueiredo, F. Moraes, S. Fumeron, B. Berche, *Cosmology in the Laboratory: an Analogy between Hyperbolic Metamaterials and the Milne Universe*, arXiv:1706.05470v1, 2017.
- R. Frigg, S. Hartmann, *Models in Science*, w: “The Stanford Encyclopedia of Philosophy” (Summer 2018 Edition), E. N. Zalta (Red.), URL = <<https://plato.stanford.edu/archives/sum2018/entries/models-science/>>. Stanford Encyclopedia of Philosophy 2009.
- C. Glymour, *Indistinguishable Space-time and the Fundamental Group*, w: *Foundations of space-time theories*, Minnesota Studies in Philosophy of Science, J. Earman, C. Glymour, J. Stachel (red.), 1977, 8, s. 50–60.
- H. F. M. Goenner, *What Kind of Science Is Sossmology?*, *Annalen der Physik*, 2010, 522, s. 389–418.
- E. R. Harrison, *Cosmology: The Science of the Universe*, Cambridge University Press, 1981.
- A. Heavens, Y. Fantaye, E. Sellentin, H. Eggers, Z. Hosenie, S. Kroon, A. Mootooyaloo, *No Evidence for Extensions to the Standard Cosmological Model*, arXiv:1704.03467, 2017.
- M. Heller, *Definicja terminu „Wszechświat” w kosmologii relatywistycznej*, *Roczniki Filozoficzne*, 1968, 16(3), s. 45–61.
- _____, *Zasady ekstrapolacji – uwagi na marginesie kosmologii*, *Zagadnienia filozoficzne w Nauce*, 1978/1979, 1, s. 23–31.
- Junji Jia, H. Zhang, *Can the Copernican Principle Be Tested Using the Cosmic Neutrino Background*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2008, 002.
- H. Kragh, *Cosmology and Controversy: The Historical Development of Two Theories of the Universe*, Princeton University Press, Princeton 1996.
- _____, *Testability and Epistemic Shifts in Modern Cosmology*, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2014, 46, s. 48–56.
- L. M. Krauss, R. J. Scherrer, *The Return of a Static Universe and the End of Cosmology*, *General Relativity and Gravitation*, 2007, 39, s. 1545–1550.
- O. Lahav, *Observational Tests for the Cosmological Principle and World Models*, w: *Structure Formation in the Universe*, R. G. Crittenden, N. G. Turok (red.). arXiv:astro-ph/0001061, doi:10.1007/978-94-010-0540-1_7, 2001, s. 131–142.
- O. Levrini, *The Substantivalist Views of Spacetime Proposed by Minkowski and its Educational Implications*, *Science and Education*, 2002, 11, s. 601–617.
- E. Ling, *Milne-like spacetimes and Their Role in Cosmology*, arXiv:1706.01408v2, 2017.
- M. S. Longair, *The Technology of Cosmology*, w: V. J. Martinez, V. Trimble, M. J. Pons-Borderia (red.), *Historical Development of Modern Cosmology*, ASP Conference Series, San Francisco 2001, 252, s. 55–74.
- T. H.-C. Lu, C. Hellaby, *Obtaining the Spacetime Metric from Cosmological Observations*, *Classical and Quantum Gravity*, 2007, 24, s. 4107–4132.
- J. Luczak, *Talk about Toy Models*, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2017, 57, s. 1–7.
- J. B. Manchak, *Can We Know the Global Structure of Spacetime?*, *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2009, 40, s. 53–56.

- B. Margalef-Bentabol, J. Margalef-Bentabol, J. Cepa, *Evolution of the Cosmological Horizons in a Concordance Universe*, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2012, 12, s. 035.
- G. McCabe, *The Structure and Interpretation of Cosmology: Part II. The Concept of Creation in Inflation and Quantum Cosmology*, Studies in History and Philosophy of Modern Physics, 2005, 36, s. 67–102.
- M. Morrison, *Modelling Nature: Between Physics & Physical World*, Philosophia Naturalis, 1998, 35, s. 65–85.
- M. Morrison, M. Morgan, *Models as Autonomous Agents*, w: Models as Mediators. Perspectives on Natural and Social Sciences, M. S. Morgan, M. Morrison (red.), Cambridge University Press, Cambridge 1999, s. 38–65.
- T. Padmanabhan, Hamsa Padmanabhan, *Cosmic Information, the Cosmological Constant and the Amplitude of Primordial Perturbations*, Physics Letters B, 2017, 773, s. 81–85.
- W. Rindler, *Visual Horizons in World-Models*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1956, 116, s. 662–677.
- D. F. Roscoe, *Via Aristotle, Leibniz, Berkeley & Mach to Necessarily Fractal Large Scale Structure in the Universe*, arXiv:0802.2889, 2008.
- K. Rudnicki, *The Importance of Cosmological Principles for Research in Cosmology*, Apeiron, 1989, 4, s. 1–13.
_____, *Zasady kosmologiczne*, Wyd. Wyższa Szkoła Ochrony Środowiska, Bydgoszcz 2002.
- L. F. Smith, J. K. Smith, K. K. Arcand, R. K. Smith, J. Bookbinder, K. Keach, *Aesthetics and Astronomy: Studying the Public's Perception and Understanding of Imagery from Space*, Science Communication, 2011, 33, s. 201–238.
- M. Suárez, N. Cartwright, *Theories: Tools versus Models*, Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics, 2008, 39, s. 62–81.
- M. Szydłowski, J. Golbiak, *Filozoficzny wybór pomiędzy zasadą indyferentyzmu a zasadą szczególnego dostrojenia*, Roczniki Filozoficzne, 2006, 54, s. 231–253.
- M. Szydłowski, P. Tambor, *Model kosmologiczny (LCDM, CDM) w schemacie pojęciowym efektywnych teorii Wszechświata*, Filozofia Nauki, 2008, 19, s. 119–139.
- M. Szydłowski, M. Hereć, P. Tambor, *Samoorganizujący się Wszechświat w różnych skalach-miejsce, gdzie nauka spotyka się z filozofią*, w: Transfer idei, Od ewolucji w biologii do ewolucji w astronomii i kosmologii, Z. E. Roskal (red.), Wydawnictwo KUL, Lublin 2011, s. 79–120.
- M. Szydłowski, P. Tambor, *Czy model Wszechświata powinien być strukturalnie stabilny?*, Roczniki Filozoficzne, 2017, 65 1, s. 65–87.
- J.-P. Uzan, *Fundamental Structures of Effective Field Theories*, Conference Talk, Philosophy of cosmology, Ténérife, Spain, 12–16 September 2014.
- S. W. Weinberg, *Gravitation & Cosmology*, Wiley 1972.
_____, *Physics: What We Do and Don't Know*, www.nybooks.com/articles/2013/11/07/ physics-what-we-do-and-dont-know/, 2013 (dostęp 2017.04.05)
_____, *To Explain the World: The Discovery of Modern Science*, HarperCollins Publishers, New York, 2015.
- P. Zeidler, *Modele Teoretyczne jako narzędzia badawcze nauk empirycznych*, Ogólnopolskie Interdyscyplinarne Seminarium Naukowe z Filozofii Przyrody i Nauk Przyrodniczych, Lublin KUL, 15 luty 2007.
- H. Zinkernagel, *Cosmology, Particles, and the Unity of Science*, Studies in History and Philosophy of Science, 2002, B33, s. 493–516.
_____, *Philosophical Aspects of Modern Cosmology*, Studies in History and Philosophy of Modern Physics, 2014, 46, s. 1–4.

THE ONTOLOGICAL AND EPISTEMOLOGICAL SPECIFICITY OF COSMOLOGY AS A SCIENCE ON THE UNIVERSE

ABSTRACT

We discuss the specificity of modern cosmology understood as the physics of the Universe. We can treat cosmology as specific because of its object, i.e. the physical Universe is specific, as well as the ways of acquiring the knowledge about the Universe are specific. We argue that the specific and, in some sense, unique methodo-

logical nature of modern cosmology compared to physics is not controversial, as it is claimed among others by Helge Kragh. In our view this specificity is natural of cosmology itself and has its foundations in: 1) the asymmetry of prediction (which favors retrognosis), 2) the temporal nature of observations applied in cosmological investigations, 3) the horizon problem and the relevance of initial conditions for cosmological evolution.

Keywords: modern cosmology, philosophy of science, methodological specificity of cosmology, the evolution of the Universe.

O AUTORACH:

Adam Krawiec — dr hab., Instytut Ekonomii i Zarządzania, Uniwersytet Jagielloński, ul. Łojasiewicza 4, 30–348 Kraków (afiliacja).

E-mail: adam.krawiec@uj.edu.pl

Marek Szydłowski — prof. dr hab., Centrum Układów Złożonych, Uniwersytet Jagielloński, Obserwatorium Astronomiczne, ul. Orła 171, 30–244 Kraków (afiliacja).

E-mail: marek.szydowski@uj.edu.pl

Paweł Tambor — dr, Wydział Teologii, Katolicki Uniwersytet Lubelski Jana Pawła II, Al. Raclawickie 14, Kolegium Jana Pawła II, skr. poczt. 129, 20-950 Lublin (afiliacja).

E-mail: pawel.tambor@kul.lublin.pl