FILOZOFIA I NAUKA
Studia filozoficzne i interdyscyplinarne
Tom 2, 2014

Marek Szydłowski[1]
Obserwatorium Astronomiczne,
Centrum Układów Złożonych im. Marka Kaca
Uniwersytet Jagielloński
Centrum Kopernika Badań Interdyscyplinarnych
Uniwersytet Jagielloński i, Uniwersytet Papieski Jana Pawła II

ONTOLOGICZNE I EPISTEMOLOGICZNE ASPEKTY POJĘCIA MODELU KOSMOLOGICZNEGO

STRESZCZENIE

W praktyce badawczej kosmologii współczesnej – tak jak i w innych dziedzinach nauki – modele teoretyczne stają się autonomicznymi narzędziami badawczymi, pozwalającymi na planowanie i przeprowadzanie obserwacji astronomicznych i eksperymentów. Na modelach, a nie na teoriach skupia się obecnie uwaga uczonych, a w konsekwencji coraz szerzej koncentrują one uwagę filozofów nauki. W pracy wykażemy, że standardowy model kosmologiczny (w skrócie SMK) ciemnej, zimnej materii ze stałą kosmologiczną (w skrócie LCDM) pełni obecnie kluczową rolę w kosmologii. Model ten jest uznawany za efektywną teorię Wszechświata. Określimy jego podstawowe ontologiczne i epistemologiczne własności oraz funkcje, jakie pełni w praktyce badawczej kosmologii. Rozważamy również, w odniesieniu do modeli kosmologicznych, główne kwestie stawiane przez filozofów nauki: kwestię statusu ontologicznego i epistemologicznego tych modeli, semantycznych funkcji standardowego modelu kosmologicznego, relacji SMK do teorii i tym podobne. Weźmiemy udział w debacie dotyczącej realizmu naukowego, redukcjonizmu w wyjaśnianiu i kwestii praw przyrody w ramach modelowego podejścia w kosmologii.

Słowa kluczowe: ontologia i epistemologia modelu kosmologicznego, metodologia kosmologii.

Modele kosmologiczne są najbardziej
interesującą kategorią
ze wszystkich rodzajów hipotez naukowych.

Karl R. Popper

[1] Adresy Autora: e-mail: marek.szydlowski@uj.edu.pl; Obserwatorium Astronomiczne UJ, ul. Orla 171, 30-244 Kraków.

WPROWADZENIE

Modele odgrywały i odgrywają kluczowe role w naukowej praktyce badawczej. Są powszechnie stosowane w nauce – nie tylko w fizyce, ale również w ekonomii, w naukach społecznych, w biologii i ekologii. Ta sytuacja generuje wielotematyczne dyskusje dotyczące modeli w filozofii nauki.

W problematyce modeli interesują nas kwestie ontologiczne i epistemologiczne. Chcemy odpowiedzieć na pytanie ontologiczne, jakimi obiektami są modele: reprezentantami obiektów fizycznych, strukturami teoriomnogościowymi, opisami, równaniami czy też wszystkim naraz (*gerrymandered ontologies*). Rozważamy też problem epistemologiczny poznawczych funkcji modeli. Wiedza pochodząca z aplikacji modeli jest użyteczna w planowaniu eksperymentów i symulacji numerycznych. Alternatywą dla koncepcji *learning with models* jest pomysł przetworzenia (*converting*) wiedzy z modelu na wiedzę dotyczącą docelowego układu. Modele „instruują" nas o naturze tego, co realne. Toczą się też aktualnie inne debaty, w tym dyskusje o relacji modeli do praw przyrody oraz o roli modeli w wyjaśnianiu naukowym.

Celem pracy jest konfrontacja niektórych filozoficznych poglądów na temat modeli z modelem standardowym w kosmologii (SMK). Kosmologia posługiwała się pojęciem modelu od samego jej początku, jednak pojęcie modelu ewoluowało wraz z ewolucją naszej wiedzy o Wszechświecie. Zatem bardzo charakterystyczny jest ewolucyjny, temporalny charakter modeli kosmologicznych. Jedne modele kosmologiczne są zastępowane przez inne w oparciu o kryteria wyboru modeli, zarówno kluczowe kryteria empiryczne, jak i również istotne kryteria estetyczne.

SMK usuwa podstawową degenerację w kosmologii, polegającą na sytuacji koegzystencji wielu modeli dopuszczalnych przez dane obserwacyjne. Jest to w pewnym sensie także model powszechnej zgody czy kompromisu na rzecz efektywnego wyjaśniania. Wszechświat nie jest przestrzennie jednorodny i izotropowy, ponieważ są w nim wielkoskalowe struktury, ale w pewnych skalach zasada kosmologiczna (ZK) posiada fizyczne uzasadnienie. Model standardowy posiada swoje ograniczenia i trudności, ale jest względnie prosty, pozwalając na zasadniczo klarowny sposób wyliczania obserwabli, planowania nowych eksperymentów i tym podobne.

Podstawowa nieokreśloność w kosmologii polega na tym, że elementem modelu są nie tylko prawa ewolucji układu, ale również warunki początkowe, które należy zadać, aby wytyczyć konkretną ewolucję. W kosmologii problem niedookreśloności rozwiązuje się w ten sposób, że rozważa się zbiór wszystkich ścieżek ewolucyjnych dla wszystkich dopuszczalnych warunków początkowych, sądząc, że obserwacje zawężą dostatecznie klasę modeli Wszechświata. Oczywiście dane obserwacyjne nie wyróżniają pojedynczego modelu, ale ich klasę.

POJĘCIE STANDARDOWEGO MODELU WSZECHŚWIATA

Kosmologia relatywistyczna od samego początku posługiwała się pojęciem modelu kosmologicznego. Jeśli za narodziny współczesnego kosmologii uznamy moment, w którym Albert Einstein zaproponował tak zwany model statyczny Wszechświata oparty na ogólnej teorii względności (OTW),[2] to rozwój kosmologii można potraktować jako zastępowanie jednych modeli przez inne. Spaja te modele fakt, że są one nadbudowywane nad Einsteinowską teorią grawitacji, w której problem kosmologiczny może być poprawnie postawiony (a nie mógł być sformułowany w sposób konsystentny, to jest wolny od paradoksów, na gruncie Newtonowskiej teorii grawitacji).

Wczesne próby konstrukcji modelu kosmologicznego akcentowały rolę teorii grawitacji. Model kosmologiczny był identyfikowany z tak zwanym kosmologicznym rozwiązaniem równań pola OTW. Przez rozwiązanie kosmologiczne rozumie się rozwiązanie o określonej symetrii przestrzeni posiadające strukturę topologiczną $R \times M^3$, gdzie M^3 jest przestrzenią maksymalnie symetryczną (jednorodną i izotropową).

Z kosmologicznego punktu widzenia przyjęcie tej zasady zwanej dzisiaj Einsteinowską zasadą kosmologiczną (Rudnicki 2002, s. 57) oznacza, że Wszechświat w dostatecznie dużej skali jest jednorodny i izotropowy (znaczy to, że średnie cechy Wszechświata jak gęstość materii, temperatura i inne są jednakowe we wszystkich jego obszarach).

Produktowa struktura czasoprzestrzeni traktowana jako rozwiązanie kosmologiczne oznacza, że ewolucja kosmologiczna jest sparametryzowana przez tak zwany czas kosmologiczny mający sens absolutny. Czas kosmologiczny jest parametrem porządkującym historię Wszechświata odmierzaną procesami fizycznymi, które w nim zachodzą.

Założenie jednorodności i izotropowości przestrzennej w jednoznaczny sposób charakteryzuje strukturę geometryczną przestrzeni OTW. Jest to struktura trójwymiarowej przestrzeni Riemannowskiej określonej z dokładnością do stałej krzywizny. Wobec tego wystarczy zrealizować tę geometrię jako powierzchnię sfery, pseudosfery lub hiperpłaszczyzny w $3+1$-wymiarowej przestrzeni euklidesowej.

Czasoprzestrzeń w modelu kosmologicznym podlega globalnej ewolucji, chociaż struktura topologiczna produktu jest zachowana w jej trakcie. Z uwagi na założone symetrie przestrzenne ewolucję tej przestrzeni można opisać jednoznacznie przy pomocy pojedynczej funkcji czasu kosmologicznego $a(t)$ zwanej czynnikiem skali.

[2] W roku 1917 Einstein opublikował *Kosmologische Betrachtungen*, pokazując możliwość konsystentnej konstrukcji modelu Wszechświata jako pewnej całości. Niektórzy (Kragh, 1996) nazywają ten moment narodzinami nowoczesnej kosmologii mający cechy rewolucji naukowej w sensie Thomasa Kuhna.

Metryka czasoprzestrzeni modelu kosmologicznego przyjmuje postać tak zwanej metryki Robertsona-Walkera:

$$(1)\qquad ds^2 = dt^2 - a^2(t)\left\{d\chi^2 + I_k^2(\chi)[d\vartheta^2 + \sin^2\vartheta d\varphi^2]\right\}$$

gdzie $(\chi, \vartheta, \varphi)$ są współrzędnymi sferycznymi w układzie współrzędnych, a t jest czasem kosmologicznym, $I_k^2(\chi) = \sin(\chi), \chi, \sinh(\chi)$ odpowiednio dla stałej krzywizny $k = +1, 0, -1$.

Ekspansja przestrzeni oznacza, że metryczna odległość r od obserwatora do galaktyki o ustalonej współrzędnej χ od obserwatora jest dana przez:

$$(2)\qquad r = \chi a(t)$$

to jest odległość własna (*proper distance*) zmienia się w czasie proporcjonalnie do czynnika skali ($\chi =$const) (zobacz rysunek 1).

Współporuszający się układ współrzędnych ($(t, \chi, \vartheta, \varphi)$ dla przestrzeni z $k = +1$ (jeden z wymiarów przestrzennych pominięto).

Galaktyka w układzie zajmuje ustaloną pozycję określoną przez współrzędne sferyczne. Na rys. $a(t)$ jest promieniem sfery, który zmienia się z czasem kosmologicznym t, nie zmieniając pozycji galaktyki A względem obserwatora O. Na rysunku zaznaczono r – własną odległość (*internal distance*) oraz odległość zewnętrzną $l = l_k(\chi)a(t) = I_k\left(\frac{r}{a(t)}\right)a(t)$ albo $r = a(t)I_k^{-1}\left(\frac{1}{a(t)}\right)$, gdzie I_k^{-1} jest funkcją odwrotną. Oczywiście w przestrzeni płaskiej odległości r i l są równe. Kąt χ jest stałą współrzędną na powierzchni.

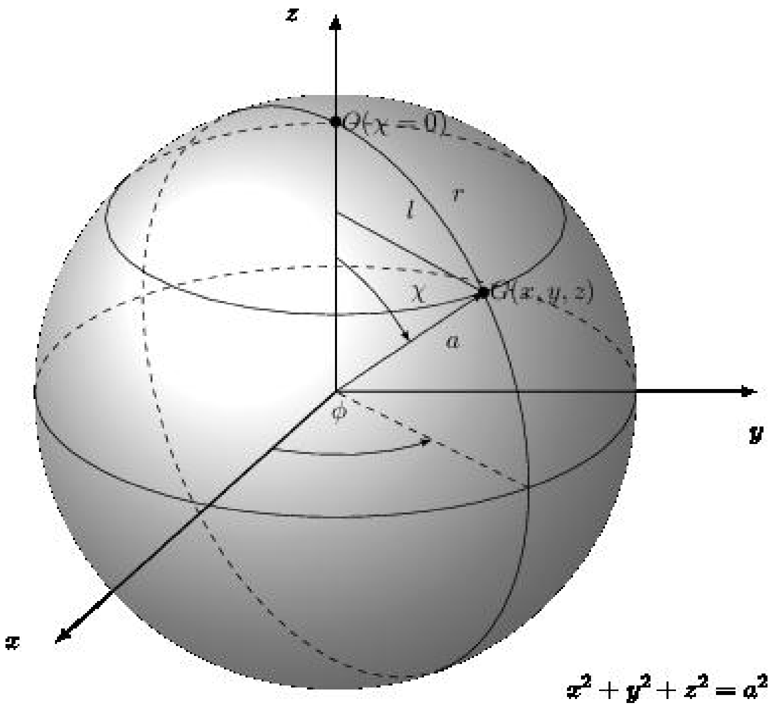
Jednorodność i izotropowość sfery (pseudosfery) lub przestrzeni płaskiej implikuje, że dla danej galaktyki prędkość jej ucieczki jest proporcjonalna do odległości. Jeśli rozważymy dowolne dwie galaktyki, to względna odległość między nimi będzie rosła w tempie:

$$(3)\qquad v_{\exp} = \frac{dr}{dt} = \chi\frac{da}{dt} = \frac{r(t)}{a(t)}\frac{da}{dt} \equiv H(t)r(t)$$

gdzie $H(t)$ jest miarą tempa ekspansji przestrzeni zwaną funkcją Hubble'a relacja (3) została empirycznie wykryta przed Edwina Hubble'a.

Fizycznie ekspansja przestrzeni oznacza kreację przestrzeni. Każdy współporuszający się sześcian zbudowany w tej przestrzeni będzie posiadał objętość, która rośnie w czasie. Kreacja przestrzeni jest czysto kosmologicznym zjawiskiem, którego nie możemy testować w laboratorium, ponieważ w skali cząstek, atomów, gwiazd czy galaktyk przestrzeń nie ekspanduje.

Liniowa zależność prędkość–odległość jest identyfikowana z obserwacyjnie odkrytym prawem Hubble'a; ma miejsce wtedy, gdy spełniona jest ZK (Peebles, 1993).



Rys. 1. Rozszerzająca się sfera we współporuszającym się układzie współrzędnych.

Założenie jednorodności i izotropowości przestrzeni dramatycznie redukuje początkowy zbiór 16 równań do dwóch niezależnych dla (0,0) oraz (1,1) składowe (czasowo-czasową oraz przestrzenno-przestrzenną – składowe równań Einsteina). W wyniku założonych symetrii równania przyjmują postać równań różniczkowych zwyczajnych drugiego rzędu na wielkość czynnika skali

$$\frac{\dot{a}^2}{a^2} + \frac{kc^2}{a^2} = \frac{8\pi G}{3c^2}\rho \tag{4}$$

$$2\frac{\ddot{a}}{a} + \frac{\dot{a}^2}{a^2} + \frac{kc^2}{a^2} = -\frac{8\pi G}{c^2} p \tag{5}$$

gdzie ρ, p są gęstościami energii i ciśnieniem cieczy doskonałej.

Przyjęcie założenia jednorodności i izotropowości powoduje, że tensor energii-pędu, stojący po prawej stronie równań Einsteinowskich równań pola, staje się on tensorem energii-pędu dla cieczy doskonałej, to jest obie funkcje są funkcjami tylko czasu kosmologicznego t,

$T^{\mu}_{\nu} = \mathrm{diag}(\rho, -p, -p, -p)$. Od tej pory będziemy przyjmować $8\pi G = c = 1$ (wybór naturalnego układu jednostek).

Z tożsamości Bianchi otrzymujemy tak zwany warunek ciągłości, który dla modeli z symetrią Robertsona-Walkera (R-W) sprowadza się do:

$$\frac{\dot{a}}{a} = -\frac{\dot{\rho}}{\rho + p}. \tag{6}$$

Równania (4) i (5) mogą być przepisane do postaci:

$$H^2 - \frac{\rho}{3} = -\frac{k}{a^2}, \tag{7}$$

oraz

$$\ddot{a} = -\frac{1}{3}(\rho + 3p)a. \tag{8}$$

Z kolei po zdefiniowaniu gęstości krytycznej $\rho_{kryt} = 3H^2$ oraz parametru bezwymiarowego gęstości $\Omega_m = \dfrac{\rho}{\rho_{kryt}}$ oraz parametru gęstości dla krzywizny $\Omega_k = \dfrac{-k}{a^2H^2}$, dostaniemy

$$\Omega_m + \Omega_k = 1; \qquad q = -\frac{a\ddot{a}}{\dot{a}^2} = \frac{1}{2}\Omega_m\left(1 + \frac{3p}{\rho}\right). \tag{9}$$

Układ równań (6)-(7) niedookreśla zagadnienia kosmologicznego, dopóki nie podamy zależności ciśnienia od gęstości energii ε.

Równanie ciągłości (6) może być zapisane w postaci $dE + pdV = 0$, gdzie $dE = d(\varepsilon V) = d(\rho c^2 V)$; V jest proporcjonalne do a^3. Taki jego zapis nawiązuje do zasady zachowania energii w laboratoryjnej termodynamice: przyrost energii układu jest równy pracy ciśnienia nad układem.

Edward Harrison (1981, 1993) podkreśla, że w kosmologii ciśnienie nie wykonuje pracy. Wszechświat należy sobie raczej wyobrażać jako podzielony na makroskopowe komórki. Każda współporuszająca się komórka o objętości V posiada identyczne wypełnienie materią i nie zachodzi ubytek energii $-pdV$ od jednej komórki do sąsiedniej, bo wszystkie doznają identycznych strat. Stąd idea ekspandujących komórek wykonujących pracę na rzecz otoczenia nie może być, zdaniem Harrisona, zaaplikowana do kosmologii.

W kosmologii dobrze postawionym problemem jest pytanie: jaki jest wzrost albo spadek energii wewnątrz pewnej skończonej objętości w układzie współporuszającym. Nie potrafimy odpowiadać na pytanie, skąd energia dociera i gdzie jest emitowana. Harrison (1981, s. 276) wyraża to w następujący sposób: „The conclusion, whether we like it or not, is obvious: energy in the universe is not conserved." Podobny pogląd sformułował

Peebles, gdy rozważał stratę energii wewnątrz współporuszającej kuli gazu fotonowego: „The resolution of this apparent paradox is that while energy conservation is good local concept, ..., there is not a general global energy conservation in general relativity." (Peebles, 1993, s. 139)

Harrison (1981, 1993) zaznacza, że kosmologiczne przesunięcie ku czerwieni w SMK jest zasadniczo odmienne od dobrze znanego laboratoryjnego efektu Dopplera i twierdzi, że jest to nowe zjawisko fizyczne ekspansji czasoprzestrzeni pomiędzy ciałami, które są stacjonarne w przestrzeni. Przesunięcie ku czerwieni z oznacza wydłużenia długości fali fotonu docierającego do obserwatora zgodnie z formułą Lemaitre'a

$$(1+z) = \frac{\lambda_0}{\lambda_1} = \frac{a_0}{a_1}, \tag{10}$$

gdzie z jest redshiftem kosmologicznym; λ_1 i λ_0 są długością fali emitowanej i obserwowanej, natomiast a_1, a_0 wartościami czynnika skali, które im odpowiadają.

Równanie (10) uzyskujemy z metryki Robertsona-Walkera (1) dla radialnej geodezyjnej zerowej (trajektorii fotonu w tej czasoprzestrzeni). Z analizy zachowania geodetyk zerowych możemy wyprowadzić obserwable kosmologiczne i zmierzyć odległości we Wszechświecie oraz tempa jego ekspansji, co stanowi domenę tak zwanej kosmografii. Największym sukcesem kosmografii jest odkrycie przyspieszonego rozszerzania się Wszechświata w jego obecnej fazie ekspansji. Obserwacje odległych gwiazd supernowych typu SNIa faworyzują standardowy model kosmologiczny (SMK) ciemnej, zimnej materii ze stałą kosmologiczną (model LCDM).

Model ten jest oparty na teorii ogólniejszej od pierwotnej teorii Einsteina, bogatszej o obecność dodatkowego członu w równaniach (człon kosmologiczny). Nie chcąc dyskutować tutaj kontekstu odkrycia stałej kosmologicznej poczynimy kilka uwag metodologicznych na temat teorii Einsteina z członem kosmologicznym i jej konsystencji (Szydłowski, Tambor, 2008).

W tym celu sięgnijmy do poglądów filozoficznych Einsteina, które towarzyszyły mu w konstrukcji równań pola. Einstein jest podawany przez filozofów nauki za przykład uczonego, dla którego racje filozoficzno-estetyczne były ważne w kontekście odkrycia teorii.

Einstein starał się zbudować swoją teorię opierając się na zasadzie „akcja-reakcja". Procesy fizyczne modelują krzywiznę czasoprzestrzeni, ale i na odwrót – sama krzywizna czasoprzestrzeni będzie miał wpływ na ich przebieg. A zatem, jeśli zmieni się tensor energii-pędu, to odpowiedzią będzie zmiana geometrii czasoprzestrzeni opisywana w terminach jej krzywizny. Inna geometria czasoprzestrzeni przełoży się na inny przebieg procesów w niej zachodzących.

Zauważmy, że w przypadku Λ tak nie jest; cokolwiek nie działoby się we Wszechświecie, jakkolwiek zmieniałby się tensor energii-pędu, Λ zawsze pozostanie stała. Tak więc, tensor energii pędu nie wpływa na nią, natomiast ona sama poprzez równania Einsteina ma wpływ na niego.[3] Innymi słowy, pierwotna intuicja fizyczna Einsteina jest łamana i nie dziwi fakt, że sam twórca OTW wycofywał się z tej koncepcji. Paradoks polega na tym, że obserwacje astronomiczne wyłoniły ten parametr jako nowy istotny parametr modelu.

Aby uzyskać odpowiednie równania dynamiczne dla modelu LCDM, należy włączyć stałą kosmologiczną do równań (6)–(9). W tym celu wystarczy wprowadzić postulat istnienia dodatkowego członu materialnego, który nie oddziałuje z materią i spełnia równanie stanu: $p_\Lambda = \rho_\Lambda$, $\rho_\Lambda = \Lambda = const$. Dla tego składnika materii możemy zdefiniować bezwymiarowy parametr gęstości Ω_Λ. Ostatecznie uzyskamy

$$p = 0 + \rho_\Lambda = -\Lambda\,; \qquad \rho = \rho_{m,0}a^{-3} + \rho_\Lambda = \rho_{m,0}a^{-3} + \Lambda\,,$$

albo

$$\Omega = \Omega_{m,0}(1+z)^3 + \Omega_{\Lambda,0}\,,$$

jeśli podzielimy przez $3H_0^2$, gdzie p i ρ są efektywnymi ciśnieniem i gęstością energii. Materia (barionowa i ciemna) spełnia równanie stany dla pyłu: $p_m = 0$.

Materia rozważana w SMK jest nierelatywistyczna i dwuskładnikowa. Uwzględnia się materię barionową (elektrony, protony, ...) oraz tak zwaną ciemną materię, która grawituje, ale nie świeci. Jest to oczywiście redukcja całej materialnej zawartości do zaledwie kilku jej składników, które głównie kontrybuują w dynamice Wszechświata. Taki redukcjonizm jest pewnym pragmatycznym wyborem najprostszego modelu opisującego ewolucję globalnej czasoprzestrzeni kosmologicznej. Zakładamy, że we Wszechświecie obecne jest promieniowanie, neutrina i inne cząstki, ale nie stanowią one głównego wkładu w kosmicznej ewolucji.

Standardowy model kosmologiczny LCDM z uwagi na postulat jednorodności i izotropowości jest bardzo szczególnym rozwiązaniem kosmologicznym Einsteinowskich równań pola grawitacyjnego. Te same równania dają rozwiązania dla gwiazd relatywistycznych, czarnych dziur i tym podobnych.

---

3 Alternatywą dla opisanej roli stałej kosmologicznej w równaniach pola jest potraktowanie jej jako pewnej stałej sprzężenia między geometrią czasoprzestrzeni (tensor Einsteina), a procesami fizycznymi (tensor energii-pędu). W tej interpretacji bazuje się na analogii do Einsteinowskiej stałej stojącej przed tensorem energii-pędu $(\kappa = \frac{8\pi G}{c^4})$. Gdyby tak było, to dla pustej czasoprzestrzeni tensor energii-pędu byłby proporcjonalny do tensora Einsteina $G_{a,b} = \Lambda g_{a,b}$, a Λ byłaby współczynnikiem proporcjonalności. Tylko teraz geometria czasoprzestrzeni staje się sprzężona z czasoprzestrzenią i zasada „akcja-reakcja" jest łamana.

Rola teorii w konstrukcji modelu polega na tym, że OTW dostarcza informacji o globalnej czasoprzestrzeni modelu kosmologicznego.[4]

SMK jest modelem, którego trudności kosmolodzy są w pełni świadomi. Pośród nich wymienia się problem płaskości, problem horyzontów, monopoli, i inne. Dodatkowo, po wprowadzeniu stałej kosmologicznej, dochodzą dwie ważne kwestie:

1. Problem szczególnego dostrojenia: Jaki jest mechanizm, który tłumaczy różnicę rzędu 10^{120} między Λ interpretowaną jako energia próżni kwantowej, a jej wartością otrzymaną z obserwacji supernowych typu SNIa?

2. Problem koincydencji: Dlaczego wartości parametrów gęstości dla Λ i materii są porównywalne w obecnej epoce: $\Omega_{m,0}$ jest w przybliżeniu równe 0,27, $\Omega_{\Lambda,0}$ jest w przybliżeniu równe 0,72, albo ciemna energia dominuje w obecnej epoce (Perivolaropoulos, 2008)?

Wprowadzenie członu kosmologicznego do równań dynamicznych determinujących tempo jego ekspansji jest najprostszym sposobem wyjaśnienia zagadki akcelerującego Wszechświata. Stała kosmologiczna łamie warunek energetyczny: $\rho + 3p \geq 0$ (taką hipotetyczną materię nazywa się ciemną energią), co w konsekwencji (8) sprawia, że Wszechświat przyspiesza: $\ddot{a} > 0$. Z obserwacji astronomicznych możemy dzięki analizie statystycznej dopasować wartość parametru gęstości dla stałej kosmologicznej i porównać ten model z innymi propozycjami teoretycznymi, które są alternatywne do modelu LCDM (zamiast członu kosmologicznego rozważa się inną hipotezę ciemnej energii).

Trudności SMK są traktowane jako jego niedoskonałości, które będzie można w przyszłości rozwiązać. Idea inflacji Wszechświata jest właśnie tego typu propozycją. Proponowany model inflacyjny jest „wciśnięty” w scenariusz ewolucyjny Wszechświata dla rozwiązania problemów płaskości, horyzontów czy monopoli. Z kolei dla rozwiązania zagadki przyspieszającego Wszechświata proponowane są również hipotezy alternatywne dla stałej kosmologicznej – jak idea kwintesencji.

Nasuwa się tutaj analogia do teorii Ptolemeusza i konstrukcji kolejnych epicykli dla wyjaśnienia obserwacji. Nie zważając na wspomniane trudności modelu standardowego, jego pozycja w kosmologii jest umacniana przez dane obserwacyjne konsystentne z modelem LCDM.

SMK pozwala na uprawianie kosmologii *modo physico*, to znaczy jako efektywnej teorii fizycznego Wszechświata, która wyznacza wartości para-

---

[4] Rozwiązania kosmologiczne określają geometrię modelu kosmologicznego w terminach metryki czasoprzestrzeni, która jest informacją lokalną, ponieważ tę samą metrykę można zrealizować w przestrzeni o różnej globalnej strukturze określonej przez jej topologię. SMK trywializuje problem topologii w tym sensie, że pomija tę zmienną (wariant topologiczny) przy pełnej świadomości takiego wyboru. Na gruncie SMK rozważa się przestrzenie trójwymiarowe o różnych topologiach i w oparciu o obserwacje astronomiczne oraz próbuje się te modele testować. Zatem, z punktu widzenia klasycznej OTW, model kosmologiczny nie jest jeden; to raczej klasa równoważnych modeli kosmologicznych z zadaną metryką o nierównoważnych topologiach.

metrów; daje możliwość wyprowadzenia obserwabli, by w oparciu o nie testować modele (Szydłowski, Tambor, 2008).

SMK, jak każda teoria efektywna, charakteryzuje się obcięciami energetycznymi, które zakłada; operowaniem parametrami, których wartość zostanie uzyskana w teorii bardziej fundamentalnej, bądź wyznaczana obserwacyjnie. Rola teorii grawitacji Einsteina, która w ocenie wielu uczonych posiada walory estetyczne, jest marginalizowana na rzecz wyliczania wielkości po to, by konstruować obserwable i planować obserwacje. Parametry (na przykład parametry gęstości dla obecnej epoki $\Omega_{i,0}$ wchodzą do obserwabli, które można estymować z danych obserwacyjnych).

Parametry kosmologiczne można w zasadzie podzielić na trzy grupy:

1. opisujące dynamikę ewolucji Wszechświata, tempo ekspansji określające zawartość materii, energii we Wszechświecie; udziały składników materii Wszechświata wyraża się w jednostkach bezwymiarowych w odniesieniu do gęstości krytycznej odpowiadającej modelowi płaskiemu;

2. parametry opisujące pierwotne zaburzenia gęstości we Wszechświecie, charakteryzujące widmo tych zaburzeń;

3. parametry pochodzenia pozakosmologicznego uwzględniające na przykład zmienność w czasie stałych fizycznych, masę neutrin, topologię Wszechświata i inne.

Oddzielną kategorię stanowią tak zwane parametry zbędne, które zwykle związane są z niewystarczającą znajomością fizyki zjawisk czy też niedokładności parametrów. Parametry kosmologiczne dzielimy na bazowe, które wystarczają do budowy modelu kosmologicznego wystarczającego do uzyskania dopasowania modelu do danych obserwacyjnych; oraz dodatkowe – polepszające (co prawda) dopasowanie modelu do danych, ale sprawiające, że model jest bardzo skomplikowany.

Podstawowy zestaw parametrów kosmologicznych to (Liddle, 2010):

— parametr Hubble'a – $h = 0{,}72 \pm 0{,}03$;

— parametr gęstości dla materii $\Omega_m h^2 = 0{,}133 \pm 0{,}006$;

— parametr gęstości dla materii barionowej $\Omega_b h^2 = 0{,}0227 \pm 0{,}0006$;

— parametr gęstości dla stałej kosmologicznej $\Omega_\Lambda = 0{,}74 \pm 0{,}03$;

— parametr gęstości dla promieniowania $\Omega_r h^2 = 2{,}47 \times 10^{-5}$;

— indeks spektralny zaburzeń gęstości $n = 0{,}963^{+0{,}014}_{-0{,}015}$;

— stosunek zaburzeń tensorowych do skalarnych $r < 0{,}43$ (95% przedział ufności);

— parametr głębokości optycznej dla procesu powtórnej jonizacji $\tau = 0{,}087 \pm 0{,}017$;

— parametr obciążenia b (*bias parameter*) opisujący rozbieżność pomiędzy obserwowanym rozkładem materii (to jest rozkładem materii świecącej) a rozkładem masy.

Cechą charakterystyczną współczesnej kosmologii jest poprawianie wartości uzyskanych parametrów przez nowe dane obserwacyjne. Pośród nich kluczową rolę odgrywają obserwacje mikrofalowego promieniowania tła (CMB), pomiar oscylacji barionowej BAO w widmie rozkładu galaktyk oraz przeglądy nieba (GdFGS, SDSS, Wiggle Z i wiele innych).

Powyższe wartości parametrów kosmologicznych są uzyskiwane z połączonych obserwacji CMB, BAO, i SNe oraz innych danych astrofizycznych.

Obok testowania staje się możliwe porównywanie modeli kosmologicznych z wykorzystaniem bayesowskich technik selekcji modeli. Wielkością opisującą prawdopodobieństwo uzyskania danych D w świetle *i*-tego modelu jest tak zwana ewidencja $P(D|M)$. Ewidencją na korzyść *i*-tego modelu względem *j*-tego uzyskamy wyznaczając tak zwany czynnik Bayesa:

$$B_{ij} = \frac{P(D|M_i)}{P(D|M_j)}.$$

Rozważmy dwa modele:

— model 1 (CMD): $\Omega_k = 0$, $\Omega_m = 1$;

— model 2 (ΛCMD): $\Omega_k = 0$, $\Omega_m = 1 - \Omega_\Lambda$.

oraz trzy kolejne próbki obserwacji SNIa:

— próbka 1 (dane SNIa z 1997): $\ln B_{21} = 0{,}31$;

— próbka 2 (dane SNIa z 1999): $\ln B_{21} = 15{,}25$;

— próbka 3 (dane SNIa z 2007, tak zwana próbka Union): $\ln B_{21} = 15{,}48$.

Dla każdej z trzech próbek został obliczony logarytm z czynnika Bayesa. O ile w przypadku pierwszej próbki mała wartość logarytmu z czynnika Bayesa nie pozwala na wyróżnienie żadnego z modeli, o tyle dwie kolejne próbki dają już silne ewidencje na korzyść SMK (modelu 2).

Pośród zestawu wartości parametrów kosmologicznych można wybrać zestaw najważniejszych parametrów, czyli dodanie nowych nie wnosi nic istotnie nowego w świetle posiadanych danych. Ten zestaw danych może być wyselekcjonowany przez kryterium informacyjne Akaike (AIC), co można interpretować w kategoriach prostoty (model SMK jest najprostszy w świetle tego kryterium).

Wśród kosmologów trwa dyskusja na temat zasadności poszerzenia modelu bazowego o dodatkowe parametry. Obecność takich parametrów została uwzględniona w popularnych kodach do obliczeń kosmologicznych takich jak CMBFAST (Seljak, Zaldarriaga, 1996). Pośród tych parametrów odnajdujemy parametr krzywizny, parametr równania stanu dla ciemnej energii parametryzowanej redshiftem $w(z)$, parametry zmienności stałej struktury subtelnej i stałej grawitacji, dodatkowe parametry związane z zaburzeniami i charakterem widma tych zaburzeń. Liddle (2004) przeprowadził analizę modelu bazowego oraz modeli rozszerzonych o dodatkowe parametry w oparciu o dane WMAP i SDSS pokazując, że kryterium informacyjne AIC (a także BIC – bayesowskie kryterium informacyjne) faworyzują model bazowy bez konieczności jego poszerzania o dodatkowe parametry.

KILKA UWAG O METODOLOGII MODELOWANIA

Jedną z podstawowych, a jednocześnie kontrowersyjnych kwestii, która pojawia się niemal w każdej pracy poświęconej badaniu modelowania w nauce, jest problem adekwatnego rekonstruowania rzeczywistej praktyki badawczej. Filozofowie nauki i metodologowie wyraźnie określają charakter metodologii jako normatywny. Stephan Hartmann, charakteryzując najważniejsze dwudziestowieczne tradycje metodologiczne, rozróżnia wstępnie dwa zasadnicze podejścia: skrajnie normatywne jak Popperowski falsyfikacjonizm lub bayesianizm oraz ujęcia znaturalizowane, których korzeni dopatruje się w pracach Thomasa Kuhna. Pierwsze narażone są często na zarzut nieprzystawania do faktycznej praktyki badawczej, choć bez wątpienia dostarczają standardów pozwalających odróżnić naukę od pseudonauki. Drugie zdają się być bliżej rzeczywistej praktyki badawczej, natomiast nie dostarczają często niezbędnych kryteriów normatywnych. Potrzeba, zdaniem Hartmanna, poszukiwać podejść łączących oba nurty. W każdym razie niezwykle użyteczne dla naszej pracy jest dokonane przez niego rozróżnienie na modelowanie w nauce i modelowanie w filozofii nauki (Hartmann, 2008).

Chcemy w tym krótkim paragrafie o charakterze metodologicznym podkreślić, że metateoretyczna analiza roli modelu w nauce jest swoistym wyzwaniem dla współczesnej metodologii. Dokonamy bardzo zasadniczego i ogólnego zarysowania tej problematyki. Na początek warto zaznaczyć trywialny podział na modele obiektów (pozwalają na użyteczną heurystycznie szeroko pojętą wizualizację[5]) i modele zachowań układów fizycznych (ich rola jest ściśle wyjaśniająca). Zasadniczo modele o charakterze dynamicznym (na przykład matematyczne równania ruchu) pozwalają na rozwijanie metodologii w kategoriach funkcji logicznych. Po pierwsze, pozwala to na ujęcie modelu w kategoriach syntaktycznych: model posiada podobną strukturę relacyjną do układu, który jest przezeń modelowany/imitowany. Jednak za pomocą modelu nie przedstawiamy tylko syntaktycznie rozumianych reguł użycia wyrażeń opisujących badany proces fizyczny; trzeba również zaproponować pewną interpretację równań, a zatem wskazać reguły semantyczne. Trzeba mieć naturalnie świadomość, że semantyczna funkcja modelu, a raczej zasięg interpretacyjny przez nią określony jest tylko częściowy. Innymi słowy, budując model możemy dostarczyć kompletu reguł syntaktycznych, natomiast nigdy nie wyczerpiemy zasoby reguł semantycznych.

---

5 Modele kosmologiczne uznaje się czasem za fizyczne wyobrażenie rozkładu materii; natomiast takie sformułowanie dotyczące geometrii jak „Wszechświat skończony, ale bez granic" nie jest dostępne wyobraźni fizycznej, ale jest ujęciem matematycznym.

Zwróćmy poza tym uwagę na rolę analogii w konstruowaniu i rozumieniu modeli. Większość fizyków nie traktuje modeli jako opisujących w sposób dosłowny układy fizyczne, ale jako analogiczne względem układów. Analogię w fizyce możemy rozumieć dwojako: a) dwie gałęzie nauki są analogiczne, jeśli układy w nich badane opisuje ten sam formalizm matematyczny, na przykład teoria ciepła i elektrostatyka; b) analogia zachodzi pomiędzy obiektami fizycznym lub wynikami eksperymentalnymi a ich modelami (czy analogia ta wskazuje na matematyczną naturę przyrody?).

W sensie ścisłym w fizyce nie ma modeli matematycznych. Samo równanie nie jest modelem. Na przykład równanie falowe możemy uznać za model tylko na mocy tego, że interpretujemy je jako opis propagacji fali w przestrzeni. Rozumienie modelu jako analogii lub twierdzenie o niedosłowności w odzwierciedleniu przyrody przez model nie jest takie samo, jak twierdzenie głoszące, że modele są idealizacjami układu fizycznego.

Szczególnie ważną funkcją modelu w nauce jest tworzenie pomostu między teorią a eksperymentem. Z pewnością w rekonstrukcjach tego typu relacji czy funkcji nie wystarczają metateoretyczne charakterystyki semantyczne (Suppe, 1989) czy syntaktyczne (Suppes, 1967). Bardziej obiecujące są ujęcia autonomicznej roli modeli względem roli teorii, szczególnie w aspekcie genetycznym, na przykład w ujęciu Nancy Cartwright czy Margaret Morrison (Cartwright, 1997; Cartwright i in., 1996; Morrison, 1998; Morrison, 2006). Możemy także powiedzieć, że dokonujemy pewnego wyjaśnienia albo eksperymentalnego testowania teorii przy pomocy modelu, natomiast samej teorii czy wykonanego testu nie nazwiemy modelem.

Modele są prezentowane w postaci zdań odnoszących się rzeczywistości empirycznej. W filozofii nauki przypisuje się modelom funkcję reprezentowania jako podstawową (Bailer-Jones, 2003). Punktem wyjścia do analiz relacji reprezentowania są następujące tezy: teorie nie odnoszą się do świata empirycznego w tym samym sensie jak modele; teorie odnoszą się do obiektów abstrakcyjnych jak „ciała”, „punkty masowe”, natomiast modele odnoszą się do konkretnych układów fizycznych. Te tezy są zgodne z praktyką nauki. W szczególności, w kosmologii podstawową kategorią badawczą jest model, nie teoria; teoria ma możliwość aplikacji (*capacity for application*); celem modelu jest natomiast dopasowanie do konkretnej sytuacji empirycznej i równocześnie pozwalanie na wyznaczenie *capacity*.

FILOZOFICZNE ASPEKTY POJĘCIA MODELU KOSMOLOGICZNEGO. PODSUMOWANIE

Studium przypadku SMK pozwala sformułować następujące uwagi, które mogą być interesujące w dyskusji nad modelami (statusem, rolą), jaka toczy się na gruncie filozofii nauki:

1. SMK jest modelem względnie niezależnym od teorii w tym sensie, że teoria była istotna na etapie sformułowania modelu, a następnie model ko-

smologiczny stał się autonomicznym narzędziem badawczym. Po przyjęciu zasady kosmologicznej została zredukowana niedookreśloność (*underestimation*) modelu.

2. Sytuacja poznawcza modelu kosmologicznego uświadamia nam nietrywialną rolę warunków początkowych w konstrukcji modelu kosmologicznego. Warunki początkowe dla ewolucji mogą być zadane w dowolnej chwili $t = t_0$; na przykład dla dzisiejszej epoki: $a(t_0) = 1$ i $\frac{da}{dt}(t_0) = H_0\sqrt{\Omega_{m,0}(1+z)^3 + \Omega_{\Lambda,0}}\Big|_{z=0} = H_0$, gdzie H_0 jest obecną wartością stałej Hubble'a.

3. W koncepcji modelu kosmologicznego występują parametry (parametry gęstości). Oznacza to, że mamy tu do czynienia z rodziną modeli parametryzowanych przez te parametry. W przypadku modelu kosmologicznego mamy dwuparametrową rodzinę modeli z parametrami $(\Omega_{\Lambda,0},\ H_0)$, które wyznacza się z danych obserwacyjnych.

4. *Case study* modeli kosmologicznych potwierdza pogląd głoszony w filozofii nauki, że modele nie mogą być „wyprodukowane" tylko z danych (indukcjonizm) bez udziału teorii. Z informacji o obecnej wartości stałej Hubble'a i wartości stałej kosmologicznej nie potrafimy zbudować modelu standardowego. Z drugiej strony sama teoria grawitacji nie daje nam algorytmu do konstrukcji modelu. Teoria grawitacji nie jest *vending machine* – automatem, do którego „wkładamy" problem i „wyskakuje" model. Konstrukcja modelu staje się raczej sztuką niż mechanicznym zabiegiem. Zasada kosmologiczna jest właśnie taką ideą, która pozwala nam ze skąpych danych astronomicznych zbudować model Wszechświata w dużej skali.

5. Modele mogą być zbudowane metodami „z góry na dół" i odwrotnie „z dołu do góry". Taki podział nie jest adekwatny w kontekście SMK, ponieważ w konstrukcji modelu są dwa etapy. W pierwszym metodą „z góry na dół" przy pomocy zasady kosmologicznej budujemy równania ewolucji czasoprzestrzeni modelu kosmologicznego. W drugim etapie, z danych astronomicznych, metodą „z dołu do góry" estymujemy wartość parametrów kosmologicznych.

6. Nową praktyką badawczą rozwijaną w kosmologii jest porównywanie (selekcja) różnych modeli kosmologicznych w oparciu o Bayesowskie techniki selekcji modeli. Model kosmologiczny można nie tylko testować przez dane obserwacyjne, ale różne modele można porównywać z punktu widzenia „siły wyjaśniającej" te dane. Praktyka selekcji modeli pozwala przewidzieć, który z modeli jest lepszy w świetle danych.

7. Przykład SMK jest ontologicznie koncepcję mieszaną (*gerrymandered ontology*). Wynika to z faktu, że SMK posiada status ontologiczny, z jednej strony, podobny (analogiczny) do statusu, powiedzmy, Bohrowskiego modelu atomu, a z drugiej strony, o SMK myślimy jak o modelu matematycznym sformułowanym w terminach równań Friedmana.

8. SMK dostarcza argumentu na rzecz relacji teoria–model, zgodnie z którą modele wkraczają tam, gdzie teorie są zbyt skomplikowane i wówczas uproszczony model staje się skuteczny w rozwiązaniu sytuacji problemowej. Równania Einsteina (podobnie do kwantowej chromodynamiki) są zbyt skomplikowane, by je aplikować bezpośrednio. Zasada kosmologiczna pozwala na redukcję układu nieliniowych równań o pochodnych cząstkowych do równań zwyczajnych drugiego rzędu. Kwantowa chromodynamika, jakkolwiek jest teorią fundamentalną, nie może być w prosty sposób użyta do badania struktury jądra atomowego, podobnie jak Einsteinowska teoria grawitacji.

9. SMK jest modelem opartym na klasycznej teorii grawitacji. Obecnie prowadzone są próby konstrukcji modelu kwantowej kosmologii. Dopóki nie dysponujemy kwantową teorią grawitacji, a jedynie różnymi koncepcjami kwantowej grawitacji (pętlowa teoria grawitacji, koncepcja dynamicznych kauzalnych triangulacji i inne) modele kosmologiczne adekwatne w epoce Maxa Plancka są tym, co nazywa się uzupełnieniem teorii. Modele kwantowej kosmologii, chociaż fenomenologiczne (w rozumieniu fenomenologiczności przyjętym przez fizyków), mogą dać nam pewne wskazówki co do konstrukcji samej teorii.

10. W filozofii nauki tradycyjnie to teorie naukowe, a nie modele uważano za nośniki wiedzy naukowej. Praktyka badawcza kosmologii pokazuje, że kluczowe w kosmologii są modele. Stąd tradycyjne debaty w filozofii nauki nad naturą praw przyrody, redukcjonizmem, wyjaśnianiem można osadzać w pojęciu modelu. W pracy pokazaliśmy, że SMK wyłonił się jako model lepszy w świetle nowych danych (w szczególności obserwacji odległych supernowych). W kosmologii dyskusja kryteriów akceptacji teorii przyjmuje formę debaty nad kryteriami wyboru modeli kosmologicznych.

11. Praktyka konstrukcji modeli kosmologicznych faworyzuje antyrealizm. Poszukiwanie modelu prawdziwego nie jest celem, do którego dążą kosmolodzy, ponieważ modele nie są prawdziwe, tylko lepsze lub gorsze, mniej lub bardziej użyteczne w praktyce badawczej.

BIBLIOGRAFIA

D. M. Bailer-Jones, *When Scientific Models Represent*, “Inter. Stud. Phil. Sci.”, 17 1, 2003, s. 59–74.

N. Cartwright, *Models: The Blueprints for Laws*, “Philosophy of Science”, 64, 1997, s. 292–303.

N. Cartwright, T. Shomar., M. Suárez, *The Tool Box of Science: Tools for Building of Models with a Superconductivity Example*, w: *Theories and Models in Scientific Processes*, W. E. Herfel et al. (red.), Rodopi, Amsterdam 1996, s. 137–149.

A. Grobler., *Metodologia nauk*, Aureus, ZNAK, Kraków 2006.

E. Harrison, *Cosmology: The Science of the Universe*, Cambridge University Press, Cambridge 1981.

______, *The Redshift-distance and Velocity-distance Laws*, "Astrophysical Journal", 403, 1993, s. 28–31.
S. Hartmann, *Modeling in Philosophy of Science*, w: *Representation, Evidence, and Justification: Themes from Suppes*, red. M. Frauchiger i W. K. Essler, Lauener Library of Analytical Philosophy, tom 1, Ontos Verlag, Frankfurt 2008.
H. Kragh, *On the History and Philosophy of Twentieth-century Cosmology* 1996.
O. Lahav, A. R. Liddle, *The Cosmological Parameters* 2010.
M. Morrison, *Modeling Nature: Between Physics and the Physical World*, "Philosophia Naturalis", 54, 1998, s. 65–85.
______, *Approximating the Real: The Role of Idealizations in Physical Theory*, w: *Idealization. XIII: Correcting the Model, Idealization and Abstraction in the Sciences*, Seria: Poznań Studies in the Philosophy of the Sciences and the Humanities, tom 86, 2006, s. 145–172.
P. J. E. Peebles, *Principles of Physical Cosmology*, Princeton University Press, Princeton 1993.
L. Perivolaropoulos, *Six Puzzles for LCDM Cosmology. The Problems of Modern Cosmology*, red. P. M. Lavrov, Tomsk State Pedagogical University Press, Tomsk 2009, 245–254.
K. Rudnicki, *Zasady kosmologiczne*, Wyższa Szkoła Ochrony Środowiska, Bydgoszcz 2002.
F. Suppe, *The Semantic Conception of Theories and Scientific Realism*, University of Illinois Press, Chicago 1989.
P. Suppes., *Set-Theoretical Structures in Science*, Stanford University Press 1967.
M. Szydłowski, P. Tambor, *Albert Einstein i stała kosmologiczna*, „Kwartalnik Historii Nauki i Techniki PAN", 3–4, 2008.
______, *Model kosmologiczny (LCDM, CDM) w schemacie pojęciowym efektywnych teorii Wszechświata*, „Filozofia Nauki", XVI, 3–4 (63–64), 2008, s. 119–139.

ONTOLOGICAL AND EPISTEMOLOGICAL ASPECTS OF THE COSMOLOGICAL MODEL

ABSTRACT

The standard cosmological model plays a crucial role in the research practice of modern cosmology. We examine ontological and epistemological aspects of this model, and its roles in the research practice of cosmology. We have found that there is not one distinguished ontology of the cosmological model. We point out different ontologies fitting it. The epistemological significance of the notion of cosmological model is also investigated, and complex epistemological roles of this notion are determined. We suggest that that the model is not an object belonging to one ontology, but it is a mixture of elements belonging to different ontological categories.

Keywords: ontology and epistemology of cosmological model, methodology of cosmology.