

Tadeusz SIEROTOWICZ

OD OBSERWACJI DO MODELU WSZECHŚWIATA O PROGRAMIE KOSMOLOGII OBSERWACYJNEJ G. F. R. ELLISA[†]

1. Wprowadzenie

Zagadnienie obserwacji w kosmologii należy niewątpliwie do podstawowych problemów tej dziedziny nauki. Dyskusje dotyczące tej kwestii mają długą i interesującą historię, która — z braku miejsca — nie może być tutaj przedstawiona¹. Pomimo tej długiej historii splot wielorakich czynników sprawił, iż pierwsze próby systematycznego potraktowania zagadnienia obserwacji w kosmologii zostały podjęte około trzydzieści lat temu, kiedy to G. F. R. Ellis wraz z grupą swoich współpracowników zainicjował program kosmologii obserwacyjnej (dalej będę go też określał programem Ellisa), stawiający sobie za cel systematyczną refleksję teoretyczną zmierzającą do zanalizowania obserwacyjnych podstaw współczesnej kosmologii. Można mówić o dwóch zasadniczych problemach podejmowanych w ramach tego programu: (1) próbie odpowiedzi na pytanie, co rzeczywiście można powiedzieć o strukturze czasoprzestrzeni i o historii Wszechświata na podstawie obecnie

*UWAGA: Tekst został zrekonstruowany przy pomocy środków automatycznych; możliwe są więc pewne błędy, których sygnalizacja jest mile widziana (obi@opoka.org). Tekst elektroniczny posiada odrębną numerację stron.

[†]Dziękuję O. G. V. Coynowi, S. J., dyrektorowi Watykańskiego Obserwatorium Astronomicznego, za umożliwienie pobytu w tymże Obserwatorium, oraz G. F. R. Ellisowi, W. R. Stoegerowi, S. J., i M. Hellerowi za pomoc i udzielone rady w czasie pisania niniejszego eseju.

¹Zob. np. M. Heller, P. Flin, Z. Golda, K. Maślanka, M. Ostrowski, K. Rudnicki i T. Sierotowicz, *Observational Cosmology. From Gauss to Sandage*, „Acta Cosmologica” 16 (1989), s. 87–106.

dostępnych obserwacji i (2) próbie określenia granic obserwacyjnej weryfikacji modeli kosmologicznych².

Podjętą realizację tego programu, grupa kierowana przez G. F. R. Ellisa odwołuje się do klasycznego studium Kristiana i Sachsa z 1966 r., w którym po raz pierwszy zostało podane ściśle sformułowanie problemu obserwacji w kosmologii³. Obecnie program Ellisa jest dobrze określoną tradycją badawczą, reprezentowaną w bibliografii przez znaczną liczbę artykułów, opracowań oraz polemik i ma na swoim koncie wiele interesujących rezultatów. Jest to jednak tradycja obejmująca kilka nurtów badań w różny sposób łączących się z główną linią tego programu. W niniejszym opracowaniu skupię się na centralnym problemie tej tradycji, pomijając inne, luźniej z nim związane kwestie. Czytelnika zainteresowanego naukową „mapą” programu Ellisa odsyłam do zamieszczonego na końcu niniejszego tekstu dodatku, w którym znajduje się tematyczna bibliografia programu kosmologii obserwacyjnej.

Zacznę od próby określenia miejsca programu Ellisa w panoramie współczesnych badań kosmologicznych. Zasadniczo program ten wysytuować można w tym nurcie badań kosmologicznych, który studiuje relacje pomiędzy „modelowym przedstawieniem rzeczywistości” (model kosmologiczny) i „samą rzeczywistością” (Wszechświat). W języku bardziej obrazowym kwestia

²Badacze rozwijający program Ellisa stwierdzają, iż celem ich poszukiwań jest odpowiedź na pytania „which cosmological observations can be used directly to determine the geometry of cosmological space–time [...] and [to] consider what the limits to verifications in cosmology are” (G. F. R. Ellis, S. D. Nel, R. Maartens, W. R. Stoeger i W. R. Whitman, *Ideal Observational Cosmology*, „Physical Reports” 124 (1985), s. 315). Być może zasadniczy cel programu Ellisa można też sprowadzić do próby odpowiedzi na pytanie postawione przez J.–C. Peckera: „what is theoretical, what is observed, and what is inferred” w dziedzinie kosmologii (J.–C. Pecker, *The Search for Valid Theories of the Universe*, „Memorie della Società Astronomica Italiana” 62 (1991), s. 499). Na marginesie tych rozważań stanowiących wprowadzenie do prezentacji programu Ellisa warto zwrócić uwagę na osobowość samego twórcy tego programu, który jest nie tylko znakomitym kosmologiem, ale i człowiekiem aktywnie angażującym się w liczne działania na rzecz pokoju i równości społecznej w swej ojczyźnie (Południowa Afryka). Na ten temat zob. np. W. Wayt Gibbs, *Profile: George F. R. Ellis. Thinking Globally, Acting Universally*, „Scientific American” 273 (1995), s. 28.

³J. Kristian i S. K. Sachs, *Observations in Cosmology*, „The Astrophysical Journal” 143 (1966), s. 379. Trzeba dodać, iż próby analiz dotyczących obserwacyjnych możliwości kosmologii były podejmowane również i przez innych badaczy. Tym niemniej wysiłki te dotyczyły w pierwszym rzędzie analizy obserwacyjnych możliwości określonych przyrządów badawczych i pomijały zwykle matematyczną analizę zagadnienia (zob. np. klasyczny artykuł A. R. Sandage’a, *The Ability of the 200-inch Telescope to Discriminate between Selected World Models*, „The Astrophysical Journal” 133 (1961), s. 335).

ta może być wyrażona pytaniem: jaka jest geometria (czasoprzestrzeni) Wszechświata oraz co i jak go wypełnia (chodzi o materię i promieniowanie obecne we Wszechświecie; są to zresztą kwestie ściśle ze sobą związane, ponieważ — jak zauważają autorzy znanego podręcznika teorii względności — „przestrzeń oddziałuje na materię, pokazując jej, jak ma się poruszać, zaś materia, oddziałując na przestrzeń, informuje tę ostatnią, jak ma się zakrzywiać”)⁴. Odpowiadając na to pytanie, kosmologia odwołuje się zwykle do pewnego zbioru obserwacji, w którym na szczególną uwagę zasługują: relacja określana mianem prawa Hubble’a, obfitość pierwiastków we Wszechświecie oraz badania dotyczące izotropii i widma mikrofalowego promieniowania tła⁵.

W dziedzinie kosmologii nie istnieje jednak jeden jedyny sposób rozwiązania powyższej kwestii, tzn. nie istnieje żaden standardowy i bezdyskusyjny sposób „zastosowania” i interpretacji owych „kosmologicznych faktów”, by użyć sformułowania J.–C. Peckera. Można tutaj wyróżnić dwa podejścia: podejście bezpośrednie i podejście odwrotne.

Pierwsze z tych podejść można opisać syntetycznie w następujący sposób. Wpierw przyjmuje się określony model Wszechświata, tj. pewien model geometrii czasoprzestrzeni wraz z określonym rozkładem materii. Następnie dokonuje się porównania przewidywań tego modelu z wynikami obserwacji. W razie rozbieżności dokonuje się korekty modelu celem uzyskania lepszego dopasowania modelu do obserwacji. Innymi słowy, podejście bezpośrednie „odwołuje się do prostych modeli geometrycznych, charakteryzujących się nielicznymi parametrami, które to modele łączone są z ostatnimi teoriami fizyki w celu uzyskania paradygmatu zdolnego do wyjaśnienia (*a strong explanatory paradigm*) tego, co obserwujemy wokół nas”⁶. Jest to sposób postępowania przypisywany w literaturze tzw. modelowi standardowemu, który zasadniczo przyjmuje model jednorodnego i izotropowego Wszech-

⁴C. W. Misner, K. S. Thorne, J. A. Wheeler, *Gravitation*, New York: Freeman 1973, s. 5.

⁵J.–C. Pecker wyróżnia osiem „kosmologicznych faktów” powszechnie cytowanych w literaturze przedmiotu: „(a) The Hubble’s relation between m and $\log(z)$; (b) The 2.7°K radiation; (c) The abundance of H, ^2D , ^4He , ^7Li ; (d) The age of globular cluster; (e) The distribution of quasars; (f) The distribution of angular diameter; (g) Galaxy count; (h) Hierarchical distribution of mass” (J.–C. Pecker, dz. cyt., s. 509).

⁶D. R. Matravvers, G. F. R. Ellis i W. R. Stoeger, *Complementary Approaches to Cosmology: Relating Theory to Observations*, „Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society” 36 (1995), s. 29.

świata (tzw. model Friedmanna–Lemaître’a–Robertsona–Walkera albo model *FLRW*, jak będą go dalej nazywał).

Drugie z wymienionych wyżej podejść, podejście odwrotne, to właśnie program kosmologii obserwacyjnej. W podejściu tym model kosmologiczny identyfikuje się z opartą na obserwacjach mapą Wszechświata. Mapa ta nie odwołuje się do przyjętych *a priori* założeń dotyczących geometrii czasoprzestrzeni Wszechświata i stara się określić tę geometrię oraz rozkład materii na podstawie obserwacji. Jak pokazują stosowne badania teoretyczne, można tego dokonać (przynajmniej w zasadzie) na stożku przeszłości obserwatora. Następnie, idąc jeszcze dalej wstecz i opierając się na znanych prawach fizyki, można próbować określić warunki określające początek ewolucji Wszechświata i tym samym skonstruować numeryczny model obserwowanej rzeczywistości. Podejście to musi rzecz jasna liczyć się z wszystkimi trudnościami związanymi z realnymi obserwacjami astronomicznymi (różne błędy obserwacyjne, absorpcja, mało liczna statystyka, efekty selekcji, ewolucja obiektów, itp.). Ponadto program ten napotyka spore trudności z interpretacją mikrofalowego promieniowania tła oraz wydaje się wyjaśniać mniej — gdy chodzi o początek i ewolucję Wszechświata — w porównaniu z modelem *FLRW*.

Program Ellisa — widziany w tej perspektywie — ma raczej charakter opisowy, ponieważ koncentruje się zwłaszcza na próbach opisu geometrii Wszechświata, pomijając właściwie kwestie dotyczące wczesnych etapów ewolucji Wszechświata. Tym niemniej podejście to oferuje możliwość ścisłego rozważenia niebanalnych kwestii dotyczących zwłaszcza zbioru danych obserwacyjnych niezbędnych do pełnego opisu geometrii Wszechświata oraz realnego znaczenia obserwacji w konstrukcji modelu kosmologicznego (granice obserwacyjnej weryfikacji w kosmologii).

Na marginesie powyższych rozważań warto dodać, iż G. F. R. Ellis w swym esej z 1991 r. zaproponował nieco ogólniejszą interpretację różnych sposobów uprawiania kosmologii⁷. Ujęcie to koncentruje się na kwestii relacji pomiędzy tym, co „lokalne” (bezpośrednie otoczenie obserwatora) i tym, co „ogólne” (całość Wszechświata). Ellis wyróżnia tutaj trzy podejścia: kosmiczne, fizyczne i interakcyjne. **Podejście kosmiczne** zmierza do odkrycia swoistych „praw kosmicznych”, określających jednoznacznie kosmologiczny model Wszechświata. Ponieważ ogólna teoria względności nie nadaje się do tej roli (prowadzi do wielu możliwych modeli kosmologicznych), a ponadto

⁷G. F. R. Ellis, *Major Themes in the Relation between Philosophy and Cosmology*, „Memorie della Società Astronomica Italiana” 62 (1991), s. 557–559.

obecnie nie widać do niej innego kandydata⁸, w ramach **podejścia fizycznego** problemy kosmologiczne są interpretowane jako problemy fizyki, tzn. dopuszcza się stosowanie praw fizyki do całego Wszechświata (do tej grupy należą zatem oba wspomniane wyżej ujęcia kosmologii). Ostatnie z wymienionych podejść (**podejście interakcyjne**) opiera się na hipotezie zakładającej zależność praw fizyki od struktury całości Wszechświata i dopuszcza możliwość istnienia różnych „fizyk” w różnych Wszechświatach⁹.

2. Program Ellisa

Pierwsza praca realizująca program Ellisa dotyczy idealnych obserwacji astronomicznych o znaczeniu kosmologicznym (tzn. założono, iż obserwacje dokonywane są z każdą żadaną dokładnością, nadto nie korzystano z równań dynamicznych)¹⁰. W pracy tej przyjęto, że prawa fizyki są wszędzie takie same i że matematycznym modelem przestrzeni Wszechświata jest para (M, g) , gdzie M jest czterowymiarową, gładką rozmaitością różniczkową

⁸Być może za kandydata do tej roli uznać można teorię kwantowej grawitacji Hartlego–Hawkinga: J. B. Hartle i S.W. Hawking, *Wave Function of the Universe*, „Physical Review D” 28 (1983), s. 2960. Popularne przedstawienie tej teorii znaleźć można w: S. Hawking, R. Penrose, *Natura czasu i przestrzeni*, Poznań: Wydawnictwo Zysk i S-ka 1996, zwłaszcza par. 5.

⁹Na ten temat zob. też S. Bergia, *Dal cosmo immutabile all’universo in evoluzione*, Torino: Bollati Boringhieri 1965, s. 146–148, 152–153. Ściśle rzecz biorąc, obecnie praktykowane jest głównie podejście fizyczne. Jedną z konsekwencji tego faktu jest ta okoliczność, iż kosmologowie, nie dysponując jedynie możliwą teorią dotyczącą Wszechświata, na podstawie wielu wskazówek (lub inaczej: poszlak — chodzi tutaj o dopiero co wspomniane „kosmologiczne fakty” — zob. przypis 5) o charakterze teoretycznym i obserwacyjnym starają się odtworzyć historię i tożsamość czegoś, co być może kiedyś zaistniało (ale nie jest całkowicie do wykluczenia, że istnieje zawsze), zaś obecnie istnieje w jednym i niepowtarzalnym, jak się wydaje, egzemplarzu (choć nie brak i interpretacji dopuszczających istnienie wielu obiektów tego rodzaju), tj. Wszechświata. Można zatem powiedzieć, iż kosmologię — jako dziedzinę poznania — „charakteryzuje zdolność do odtwarzania na podstawie danych obserwacyjnych pozornie bez znaczenia złożonej rzeczywistości bezpośrednio nieobserwowalnej” (C. Ginzburg, *Spie. Radici di un paradigma indiziario*, [w:] A. Gargani (ed.), *Crisi della ragione. Nuovi modelli nel rapporto tra sapere e attività umane*, Torino: Einaudi 1979, s. 67). Ze względu na fakt, iż jest to sposób postępowania poznawczego wykazujący liczne podobieństwa ze sposobem postępowania występującym np. w dziedzinach historii czy geologii, niektórzy badacze mówią w tym kontekście o poszlakowym paradygmacie poznawczym kosmologii (zob. też S. Bergia, dz. cyt., s. 139–141).

¹⁰Zob. G. F. R. Ellis, S. D. Nel, R. Maartens, W. R. Stoeger i A. P. Whitman, dz. cyt. (praca ta jest często cytowana jako *Observational Cosmology I and II*.) Na temat rozróżnienia na cechy kinematyczne i cechy dynamiczne w modelach kosmologicznych zob. np. S. Bergia, dz. cyt., s. 76 i 103–105.

(*differentiable manifold*), zaś g określoną na niej metryką Lorentza. Zasada Kopernika nie jest tutaj brana pod uwagę. Realizacja programu polegała na próbie wyrażenia metryki (g) w tzw. współrzędnych obserwacyjnych, czyli takich współrzędnych, które można przetłumaczyć bezpośrednio na terminy obserwacyjne. Nadto zaś, gdyby udało się wyrazić pochodne składowych tensora metrycznego we współrzędnych obserwacyjnych, to wówczas można by skonstruować model czasoprzestrzeni na podstawie obserwacji.

Współrzędne obserwacyjne $[x_i] = [w, y, \vartheta, \Phi]$ określa się w odniesieniu do historii Galaktyki lub naszej Gromady Galaktyk. Historia ta jest w założeniu gładką, czasopodobną krzywą geodezyjną (C), zaś powierzchnie wyznaczone przez warunek: $w = w_0 = \text{const}$ są stożkami świetlnymi zdarzeń leżących na krzywej C . Czas własny w mierzony jest wzdłuż krzywej C , zaś sytuacja $w = w_0$ odpowiada zdarzeniu q , czyli „tu i teraz” obserwatora.

Stożek świetlny przeszłości zdarzenia q niech będzie oznaczony przez $L - (q)$. Współrzędne ϑ i Φ można tak znormalizować, aby stały się one współrzędnymi sferycznymi na sferze niebieskiej, względem pewnego nierotującego układu odniesienia. Współrzędna $x_1 = y$ mierzy czasoprzestrzenną odległość wzdłuż zerowych krzywych geodezyjnych, przy czym istnieje możliwość zidentyfikowania tej współrzędnej z operacyjnie mierzonymi „odległościami”.

Ogólny wniosek wyprowadzony z analiz omawianej pracy (*Observational Cosmology I*) jest pesymistyczny: idealne obserwacje astronomiczne nie wystarczają do jednoznacznego odtworzenia geometrii czasoprzestrzeni na stożku świetlnym przeszłości $L - (q)$, ani też nie pozwalają na określenie, w jaki sposób trójwymiarowa hiperpowierzchnia, będąca stożkiem świetlnym przeszłości, zanurzona jest w rozmaitości M . Co więcej, obserwacje te nie pozwalają również na udowodnienie sferycznej symetrii czasoprzestrzeni wokół q . Wnioski te nie ulegają zmianie nawet po uwzględnieniu skończonego czasu trwania obserwacji.

W drugiej pracy poświęconej realizacji programu Ellisa (*Observational Cosmology II*) nadal nie wprowadzono założeń dotyczących symetrii czasoprzestrzeni, natomiast uwzględniono równania dynamiczne ogólnej teorii względności. Po przystosowaniu współrzędnych obserwacyjnych do użycia w równaniach pola (współrzedną y można w tym przypadku zastąpić przesunięciem ku czerwieni z), autorzy zmierzali do określenia danych Cauchy’ego dla równań pola na stożku $L - (q)$ i następnie do całkowania tych równań na tym stożku i poza nim. Całkowanie na $L - (q)$ odbywa się wstecz do pewnej wartości $y = y_\bullet$ ($z = z_\bullet$), które to ograniczenie bierze się z faktu nieprzezro-

czystości bardzo wczesnego Wszechświata dla promieniowania elektromagnetycznego. Dodatkową przeszkodą w całkowaniu wstecz mogą być tzw. kaustyki, których istnienie może być związane z topologią czasoprzestrzeni lub ze zjawiskiem soczewkowania grawitacyjnego.

Dane Cauchy'ego stanowią tzw. maksymalny zbiór danych $D(w_0, z_\bullet)$ złożony z następujących idealnych obserwacji: przesunięć ku czerwieni (z), ruchów własnych (u^A : składowe czterowektora prędkości dla $A = 1, 2$), odległości galaktyk (*area distances* — $r(z)$), dystorsje obrazów obserwowanych obiektów ($\sigma(dy/dz)$) oraz wyników zliczeń odległych galaktyk i kwazarów do wartości $z = z_\bullet$ (pozwala to na uzyskanie wielkości mdy/dz , gdzie m to całkowita gęstość energii). Przy zastosowaniu powyższych oznaczeń, zbiór D można zapisać jak następuje:

$$D(w_0, z_\bullet) = \{(z, u^A, r(z), \sigma dy/dz, mdy/dz) : w = w_0, 0 \leq z < z_\bullet\}$$

Przy tej okazji warto przypomnieć pojęcie tzw. czasoprzestrzeni obserwacyjnej. Otóż czasoprzestrzeń (M, g) , będącą rozwiązaniem równań Einsteina, nazywa się czasoprzestrzenią obserwacyjną stowarzyszoną ze zbiorem $D(w_0, z_\bullet)$, jeżeli zawiera ona taką zerową hiperpowierzchnię Σ , że $\Sigma \cup q$ jest stożkiem $L - (q)$, zaś wszystkie dane obserwacyjne przewidywane przez model (M, g) są danymi wchodzącymi w skład zbioru $D(w_0, z_\bullet)$. Jeżeli istnieje więcej niż jedna czasoprzestrzeń obserwacyjna stowarzyszona ze zbiorem $D(w_0, z_\bullet)$, to mamy wówczas do czynienia z obserwacyjną nieokreślonością modelu kosmologicznego.

Główne osiągnięcie omawianej tutaj pracy polega na wykazaniu, że $D(w_0, z_\bullet)$ jest najmniejszym zbiorem danych obserwacyjnych potrzebnych do jednoznacznego określenia przy pomocy równań Einsteina geometrii na stożku $L - (q)$ wstecz, aż do $z = z_\bullet$ (znajomość idealnych danych obserwacyjnych $D(w_0, z_\bullet)$ jest warunkiem koniecznym i wystarczającym do wykonania tej operacji). Trzeba tu jednak dodać, iż struktura geometryczna stożka przeszłości nie stanowi całego modelu kosmologicznego. Wymagane jest bowiem przedłużenie rozwiązań do obszarów wewnątrz stożka i ku przyszłości¹¹.

Innym ważnym wynikiem omawianych tutaj prac (*Observational Cosmology I i II*) jest wykazanie, iż izotropia mikrofalowego promieniowania

¹¹S. Bergia zauważa, że w celu otrzymania modelu kosmologicznego należy nie tylko wskazać globalne rozwiązanie równań pola, odpowiadające danej geometrii (Bergia ma tutaj na myśli podejście *FLRW*), lecz także należy określić klasę podstawowych obserwatorów (S. Bergia, dz. cyt., s. 63, zob. też G. F. R. Ellis i R. Williams, *Flat and Curved Space-Time*, Oxford: Clarendon Press 1988, s. 172).

tła nie wystarcza do udowodnienia izotropii czasoprzestrzeni wzdłuż linii świata obserwatora, przy założeniu, że odrzuci się zasadę Kopernika. Do takiego wniosku upoważnia jednak izotropia zliczeń galaktyk, z jednoczesnym zanikiem kosmologicznych ruchów własnych i zniekształceń obrazów. W tych okolicznościach Wszechświat okazuje się być Wszechświatem Lemaître’a–Tolmana–Bondiego, obejmującym też specjalne przypadki jednorodnego modelu $FLRW$ ¹².

W następnych pracach realizujących program Ellisa została podana ogólna metoda całkowania równań pola wyrażonych we współrzędnych obserwacyjnych (przesunięcie ku czerwieni, zliczenia, odległości (*area distances*)) w przypadku sferycznie symetrycznego pyłowego ($p = 0$) Wszechświata oraz w przypadku takiego samego modelu, ale z perturbacją¹³. W tym drugim przypadku model $FLRW$ może być uważany za rozwiązanie zerowego rzędu, które następnie jest „perturbowane”, aby zdać sprawę z odchyłeń obserwowanych wielkości od tych, które odpowiadają modelowi dokładnie $FLRW$ (tego typu „perturbacyjne” postępowanie prowadzi do tego, co zwykle w ramach programu Ellisa określa się mianem modeli prawie- $FLRW$). Należy tutaj dodać, iż do wyżej wymienionych perturbacji wchodzi nie tylko odchylenie od modelu dokładnie $FLRW$, ale także błędy obserwacyjne, efekty selekcji oraz niekompletność danych obserwacyjnych. W zasadzie istnieje możliwość oddzielenia tych składowych, o ile uzna się, iż perturbacjami modelu dokładnie $FLRW$ w ścisłym tego słowa znaczeniu są tylko te, które przekraczają średnie wartości błędów pomiarowych¹⁴.

Następne badania dotyczące tej metody pozwoliły na dalsze zredukowanie równań pola do równania różniczkowego pierwszego rzędu na stożku $L - (q)$ (we współrzędnych obserwacyjnych odległość–zliczenia). Umożliwiło to szczegółowe pokazanie, w jaki sposób obserwacje (np. zależności odległość–przesunięcie ku czerwieni albo zliczenia–przesunięcie ku czerwieni) mogą być wykorzystane do całkowania równań pola na stożku prze-

¹²R. Maartens i D. R. Matravers, *Isotropic and Semi-isotropic Observations in Cosmology*, „Classical and Quantum Gravity” 11 (1994), 2693.

¹³Zob. następujące prace W. R. Stoegera, G. F. R. Ellisa i S. D. Nela opublikowane w 1992 roku w nr. 9 czasopisma „Classical and Quantum Gravity”: *Observational Cosmology: III. Exact Spherically Symmetric Dust Solutions* (s. 509) oraz *Observational Cosmology: IV. Perturbed Spherically Symmetric Dust Solutions* (s. 1711).

¹⁴Zob. przedstawianą niżej obserwacyjną zasadę nieoznaczoności w kosmologii.

szości obserwatora i w konsekwencji do określenia metryki i rozkładu materii na tym stożku¹⁵.

Jednym z nowszych nurtów badań w programie Ellisa są analizy dotyczące mikrofalowego promieniowania tła. Odkrycie tego promieniowania w 1965 r. okazało się być wydarzeniem niezwykle ważnym dla współczesnej kosmologii, zwłaszcza zaś dla modeli *FLRW*, bowiem wysoce izotropowy charakter promieniowania tła jest zwykle interpretowany jako argument na ich korzyść¹⁶. Kwestia mikrofalowego promieniowania tła pozostawała przez dłuższy czas poza głównym nurtem badań w ramach programu Ellisa m. in. z tego powodu, iż promieniowanie to raczej nakłada pewne globalne warunki na całą czasoprzestrzeń Wszechświata, niż pozwala na określenie geometrii jej poszczególnych obszarów. Tym niemniej brak systematycznego potraktowania tego tak istotnego dla kosmologii współczesnej „faktu”, stanowił dosyć poważną lukę w programie kosmologii obserwacyjnej. Dopiero w ostatnich latach luka ta została uzupełniona poprzez interesującą grupę prac uwzględniających to promieniowanie w ramach omawianego tutaj programu.

Promieniowanie tła nie wchodzi do zbioru $D(w_0, z_\bullet)$, tym niemniej autorzy rozwijający program Ellisa uzyskali interesujące wyniki, analizując niektóre jego charakterystyki. Chodzi tu zwłaszcza o analizę tzw. efektu Sachsa–Wolfe’a we współrzędnych obserwacyjnych¹⁷ oraz o dowód twierdzenia dotyczącego geometrii czasoprzestrzeni Wszechświata (a nie tylko geometrii na stożku $L - (q)$). Poświęćmy nieco uwagi tej ostatniej kwestii.

Punktem wyjścia jest tutaj twierdzenie Ehlersa, Geren i Sachsa (dalej twierdzenie *EGS*)¹⁸. Twierdzenie to mówi, że jeżeli wszyscy obserwatorzy znajdujący się w czasoprzestrzeni stwierdzają izotropowość promieniowania

¹⁵Zob. W. R. Stoeger, S. D. Nel i G. F. R. Ellis, *Observational Cosmology: V. Solutions of the First-order General Perturbation Equations*, „Classical and Quantum Gravity” 9 (1992), s. 1725.

¹⁶Historię odkrycia promieniowania tła i jego pierwsze interpretacje przedstawiam m. in. w: *Mikrofalowe promieniowanie tła jako «experimentum crucis» w kosmologii?* Kraków: Wydział Filozoficzny Towarzystwa Jezusowego 1993; ostatnie wyniki obserwacji tego promieniowania przedstawia np. C. L. Bennett [i in.] w artykule *Four-Year COBE DMR Cosmic Microwave Background Observations: Maps and Basic Results*, „The Astrophysical Journal” 464 (1966), L1.

¹⁷Zob. W. R. Stoeger, G. F. R. Ellis i C.–M. Xu, *Observational Cosmology: VI. The Microwave Background and the Sachs–Wolfe Effect*, „Physical Review D” 49 (1994), s. 1845.

¹⁸Zob. J. Ehlers, P. Geren i R. K. Sachs, *Isotropic Solution of the Einstein–Liouville Equation*, „The Journal of Mathematical Physics” 9 (1968), s. 1344.

tła¹⁹, to wówczas czasoprzestrzeń jest *FLRW*. W twierdzeniu *EGS* mówi się o ściślejszej izotropowości promieniowania tła i o modelu *FLRW* dla czasoprzestrzeni Wszechświata. Ponieważ jednak promieniowanie tła nie wykazuje idealnej izotropowości, ani też Wszechświat nie jest dokładnie *FLRW*, stąd też zrodziła się idea udowodnienia prawie–twierdzenia *EGS*, słusznego dla prawie izotropowego promieniowania tła. Dowód tego twierdzenia został podany przez Stoegera, Maartensa i Ellisa w 1995 r.²⁰.

Prawie–twierdzenie *EGS* można sformułować w następujący sposób. Jeżeli: (1) w rozszerzającym się Wszechświecie obowiązują równania Einsteina–Liouville’a, (2) Wszechświat wypełniony jest materią i promieniowaniem, które nie oddziałują ze sobą²¹, (3) we współporuszającym się z materią układzie odniesienia swobodnie propagujące się promieniowanie tła jest prawie izotropowe w pewnym obszarze U (prawie izotropowe = odchylenie pierwszego rzędu od izotropii, traktowanej jako wyraz „zerowy”), to wówczas czasoprzestrzeń jest prawie–*FLRW* w obszarze U .

Powyższe twierdzenie, wobec wysoce prawdopodobnego istnienia odstępstw od izotropowości w obserwowanym rozkładzie przestrzennym promieniowania tła, stanowi silny argument na rzecz tezy o prawie izotropowości i prawie jednorodności Wszechświata w dużych skalach. Prawie–twierdzenie *EGS* nie podaje jednak dokładnej interpretacji sformułowania „w dużych skalach”, a zatem nie wiadomo, w jakiej skali Wszechświat efektywnie jest prawie–*FLRW*. W tej kwestii nie ma zgody w obozie kosmologów i być może podejście komplementarne, o którym jest mowa w par. 4, ułatwi rozwiązanie tego problemu.

Na zakończenie tej części artykułu warto uczynić nieco ogólniejszą uwagę. Otóż w dotychczas omawianych pracach należących do programu Ellisa uwzględniane były idealne obserwacje astronomiczne (tj. bez żadnego błędu). Rzecz jasna, realne obserwacje astronomiczne są zawsze obciążone różnego rodzaju błędami i efektami selekcji. Niech $R(w_0, z_\bullet)$ oznacza realne obserwacje astronomiczne wchodzące do zbioru $D(w_0, z_\bullet)$. W interesują-

¹⁹To założenie omawianego tutaj twierdzenia jest jeszcze jednym sformułowaniem zasady Kopernika.

²⁰Zob. W. R. Stoeger, R. Maartens i G. F. R. Ellis, *Proving almost–homogeneity of the Universe: an almost Ehlers–Geren–Sachs Theorem*, „The Astrophysical Journal” 443 (1995), s. 1.

²¹Tak więc, ściśle rzecz biorąc, prawie–twierdzenie *EGS* opisuje sytuację panującą we Wszechświecie od tzw. powierzchni ostatniego oddziaływania między materią a promieniowaniem, tj. od powierzchni, z której zostało „wypromieniowane” mikrofalowe promieniowanie tła aż do dzisiaj.

cej monografii *Teoretyczne podstawy kosmologii*, opublikowanej w 1988 r., M. Heller pisał, iż uwzględnienie tych obserwacji doprowadzi do wystąpienia znacznej nieokreśloności obserwacyjnej modeli kosmologicznych, przejawiającej się w niejednoznaczności określania geometrii na stożku $L - (q)$. Znaczy to, iż zbiór $R(w_0, z_\bullet)$ nie wystarcza do jednoznacznego określenia geometrii na stożku przeszłości obserwatora, ponieważ danemu zbiorowi obserwacji $R(w_0, z_\bullet)$ odpowiada więcej niż jedna geometria czasoprzestrzeni na stożku $L - (q)$ (innymi słowy, zbiorowi $R(w_0, z_\bullet)$ odpowiadać będzie więcej niż jedna stowarzyszona z nim realistyczna czasoprzestrzeń obserwacyjna, definiowana analogicznie, jak to było w przypadku zbioru $D(w_0, z_\bullet)$). Obecny stan rozwoju programu Ellisa zdaje się nie przeczyć tej intuicji M. Hellera, którą określić można mianem *obserwacyjnej zasady nieoznaczoności w kosmologii*²².

Zasada ta wyraża niemożliwość przekroczenia w opisie Wszechświata pewnych barier wynikających z samej natury badanego obiektu (Wszechświat jako całość) i stwierdza niejednoznaczność takiego opisu opartego jedynie na określonym zbiorze obserwacji. W tym więc sensie może ona być uważana za kosmologiczny odpowiednik zasady określanej w literaturze przedmiotu mianem *zasady doświadczalnego niedookreślenia teorii naukowych*²³. Według tej zasady „informacje dostarczane przez dane obserwacyjne nie są wystarczające do określenia, która z teorii naukowych jest prawdziwa. Dostępny materiał obserwacyjny, jak czasem zwykło się mówić, nie dookreśla teoretycznego opisu świata”²⁴.

Pośród prac realizujących program Ellisa szczególnie interesujące są te artykuły, które bądź to podejmują polemikę z niektórymi, rozpowszechnionymi ujęciami w ramach kosmologii współczesnej, bądź też proponują swoiste eksperymenty myślowe w dziedzinie kosmologii. Znaczenie tych prac wynika z faktu, iż zwykle podejmuje się w nich dyskusję różnych założeń (filozoficznych i nie tylko) znajdujących się u podstaw takiego czy innego modelu kosmologicznego. Zacznę od krótkiej prezentacji tej drugiej grupy artykułów.

²²M. Heller, *Teoretyczne podstawy kosmologii*, Warszawa: PWN 1988, s. 111.

²³Zob. np. P. Kosso, *Leggere il libro della natura. Introduzione alla filosofia della scienza*, Bologna: il Mulino 1995, s. 96–132. Ściśle rzecz biorąc jest to pewna interpretacja tezy Duhema–Quine’a.

²⁴Tamże, s. 96.

3. Eksperymenty myślowe w kosmologii

Modele kosmologiczne, które określam tutaj mianem eksperymentów myślowych w kosmologii, proponują zwykle alternatywne wyjaśnienia klasycznego zbioru obserwacji, będącego podstawą tzw. standardowego modelu kosmologicznego, i zdają się sugerować, iż ten sam zbiór danych może prowadzić do istotnie różnych modeli Wszechświata. W tym też sensie owe eksperymenty myślowe byłyby rodzajem ilustracji wprowadzonej wyżej zasady obserwacyjnej nieoznaczoności w kosmologii. Ponadto są one jeszcze jedną ilustracją centralnej roli zasad kosmologicznych w konstrukcji różnych modeli kosmologicznych, ponieważ każdy z owych eksperymentów myślowych opiera się na innym zbiorze tychże zasad.

W 1978 r. Ellis, Maartens i Nel zaproponowali statyczny i sferycznie symetryczny model Wszechświata (dalej cytowany jako model $SSS = Static, Spherically Symmetric Universe Model$)²⁵. Cechą charakterystyczną modelu SSS jest odrzucenie założenia o jednorodności Wszechświata i przyjęcie istnienia w nim dwóch wyróżnionych punktów. Jednym z nich jest ciągle oddziałująca z Wszechświatem osobliwość, drugim zaś nasza Galaktyka. Osobliwość oddziałując ciągle z Wszechświatem sprawia, iż termiczną historię Wszechświata w modelu SSS rozumieć trzeba nie jako rozciągającą się w czasie, ale raczej jako rozciągającą się w przestrzeni. Mikrofalowe promieniowanie tła powstaje w gorącej gazie otaczającym tę osobliwość, natomiast przesunięcie ku czerwieni linii w widmach galaktyk ma charakter grawitacyjny. Ellis i jego współpracownicy rozważając szczegółowo model SSS pokazali, iż obserwacyjne stwierdzenie izotropowości promieniowania tła nie implikuje jednoznacznie izotropowości przestrzeni wokół obserwatora.

Autorom omawianego tutaj modelu udało się skonstruować jedynie kosmograficzny opis obserwacji (tzn. użyto jedynie równań kinematycznych). Próby zastosowania równań Einsteina do tego modelu nie zostały uwieńczone powodzeniem. Niemniej pewne aspekty tego podejścia wydają się interesujące ze względów tak kosmologicznych (koncepcja osobliwości w niejednorodnym Wszechświecie), jak i filozoficznych (obserwator w centrum Wszechświata).

Innym ciekawym eksperymentem myślowym rozwijanym przez G. F. R. Ellisa jest tzw. model małego Wszechświata (*Small Uni-*

²⁵G. F. R. Ellis, R. Maartens i S. D. Nel, *The Expansion of the Universe*, „Monthly Notices of the Royal Astronomical Society” 184 (1978), s. 439.

verse Model)²⁶. Możliwość konstrukcji tego typu modelu opiera się na fakcie, iż równania pola nie określają topologii całego Wszechświata, która w tej sytuacji winna być określona na podstawie obserwacji. W modelu tym wielkoskalowa struktura przestrzeni Wszechświata przypomina nieco pszczeli plaster miodu i jest „zbudowana” z wielu „powtórzeń” niewielkiego, zamkniętego obszaru przestrzeni (rodzaj „komórki podstawowej”) o rozmiarach rzędu 200 Mpc, który może być wysoce niejednorodny. Ponieważ jednak obserwator dostrzega wiele obrazów tej samej „podstawowej komórki”, a promieniowanie każdej galaktyki wielokrotnie obiega Wszechświat w koło, tworząc swój zwielokrotniony obraz na niebie, to Wszechświat jako całość wydaje się być jednorodny. Wygląda to tak, jakby ktoś wszedł do małego pokoju, którego ściany, podłoga i sufit pokryte są płytami lustra. To, co się wówczas zobaczy, jest nieskończenie wielką ilością własnych odbić we wszystkich kierunkach.

Z obserwacyjnego punktu widzenia model ten jest zgodny z modelem standardowym (*FLRW*), ale jego globalna topologia jest zdecydowanie różna. Testowanie tego typu modeli sprowadzać się może do poszukiwania wtórnych obrazów dużych galaktyk. Warto tu może jeszcze dodać, że w takim Wszechświecie nie istnieje tzw. problem horyzontu, zaś geometria Wszechświata może być w zasadzie określona na podstawie obserwacji, ponieważ cała istniejąca materia wypełnia „podstawową komórkę” małego Wszechświata i jako taka może być obserwowana w całości.

Na marginesie powyższych rozważań należy podkreślić jeszcze jedną kwestię. Otóż pomimo odwołania się do eksperymentów myślowych G. F. R. Ellis nie byłby zapewne skłonny do przyjęcia stanowiska J.–C. Peckera, dotyczącego uprawiania kosmologii (nazwijmy to podejście *zasadą metodologicznego pluralizmu w kosmologii*). Otóż J.–C. Pecker proponuje, aby w kosmologii „podtrzymywać” przy życiu kilka modeli kosmologicznych, które należy ciągle konfrontować z dostępnymi danymi obserwacyjnymi. Ta propozycja Peckera jest wyrazem krytyki wobec podejścia określonego na wstępie niniejszego rozdziału mianem podejścia bezpośredniego, ponieważ wstępne przyjęcie takiego czy innego modelu kosmologicznego, jako podstawy rozważań kosmologicznych, prowadzić może do swoistego efektu selek-

²⁶Zob. np. G. F. R. Ellis, *Observational Properties of Small Universes*, w: W. R. Stoeger, S. J. (ed.), *Theory and Observational Limits in Cosmology*, Città del Vaticano: Specola Vaticana 1987, s. 475.

cji w interpretacji obserwacji astronomicznych (ten aspekt krytyki Peckera byłby zapewne do przyjęcia przez Ellisa)²⁷.

Komentując to stanowiska J.–C. Peckera warto zauważyć, iż według G. F. R. Ellisa jednym z najważniejszych problemów, jaki kosmologia musi rozwiązać, jest problem uzasadnienia jedyności proponowanego modelu Wszechświata (wbrew intuicjom Peckera). Rozwiązanie tego problemu nie może jednak być osiągnięte bez odwołania się do filozofii (metafizyki) w uprawianiu kosmologii. W terminologii Ellisa sformułowanie to oznacza konieczność przyjęcia określonych zasad wyboru modeli kosmologicznych, które mają właśnie metafizyczny — tj. niekontrolowalny obserwacyjnie — charakter, jak np. prostota, zdolność do wyjaśniania faktów czy piękno²⁸.

4. Polemiki

G. F. R. Ellis i jego współpracownicy dosyć często podejmują polemiki z niektórymi dominującymi i popularnymi wśród badaczy (i nie tylko) modelami w ramach kosmologii współczesnej²⁹. Zwykle polemiki te pokazują, iż

²⁷ „On one side, we have people who, starting from a simplicity principle, be it God or Occam’s razor, or some cosmological principle, or else, use a **small** number of observed facts, built their model, and later, adjust the model by details to fit new known facts, sticking to the model, *for simplicity*, and using, so to say, a procrustean linearized bed to force the model into the new data. On the other side, we have people who keep alive all sorts of models, and evaluate permanently their respective value in front of the new observations or new statistics, in spite of the only too obvious flaws of some of these models” (J.–C. Pecker, dz. cyt., s. 508). Zasada metodologicznego pluralizmu w kosmologii odpowiada interpretacji kosmologii (ale tylko w jej aspekcie teoretycznym!) jako teorii badającej przestrzeń rozwiązań równań Einsteina (*the Ensemble of Universes*); zob. M. Heller, *On the Cosmological Problem*, „Acta Cosmologica” 14 (1986), s. 57.

²⁸ „The major problem in Cosmology is in justifying a claim of *uniqueness* for a proposed universe model. One can use some combination of philosophical principles and observational data to obtain a unique model (it is necessary to introduce philosophical principles because a purely observational approach is in practice unable to determine a unique universe model)” (G. F. R. Ellis, *Relativistic Cosmology: Its Nature, Aims and Problems*, [w:] B. Bertotti, F. de Felice i A. Pascolini (ed.), *General Relativity and Gravitation*, Dordrecht–Boston–Lancaster: D. Reidel Publishing Company 1984, s. 257). W jednym ze swoich esejów G. F. R. Ellis pisze jasno, iż „cosmology is based on an interplay between philosophy and observations” (G. F. R. Ellis, *The Physics and Geometry of the Universe: Changing Viewpoints*, „Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society” 34 (1993), s. 315). Znaczenie używanych tutaj określeń „metafizyczny” i „zasada kosmologiczna” wyjaśniam w artykule *O kosmologicznych tradycjach badawczych*, „Filozofia Nauki” 13 (1996), s. 81.

²⁹ Dotyczy to zwłaszcza krytyk pod adresem modelu inflacyjnego — zob. np. T. Rothman i G. F. R. Ellis, *Metafakcja*, „Postępy Astronomii” 35 (1987), s. 169. O historii

wiele spośród przyjmowanych w tych modelach założeń ma charakter metafizyczny, oraz podkreślają zasadność przyjęcia ujęć alternatywnych. By dać przykład tego typu polemiki, odwołam się do artykułu opublikowanego w 1995 r. przez Matraversa, Ellisa i Stoegera.

W artykule tym autorzy podejmują otwartą polemikę z tym sposobem uprawiania kosmologii, który określają oni jako podejście standardowe (*the standard approach* albo też *the FLRW model-building approach*)³⁰. Przyjęcie modelu *FLRW*, w ramach powyższego podejścia, jest oczywiście założeniem metafizycznym, które nie jest bezpośrednio sprawdzalne na drodze obserwacyjnej. Obserwacje bowiem — a zwłaszcza te, dotyczące wielkoskalowego rozkładu materii we Wszechświecie — wydają się wskazywać, iż skala odległości, na której Wszechświat staje się *FLRW*, albo prawie-*FLRW*, musi być co najmniej rzędu 100 Mpc. Tym niemniej, jak zauważają autorzy omawianego tutaj artykułu, model *FLRW* może być przyjęty jako dobre, zerowe przybliżenie struktury całego Wszechświata. Ale tylko jako przybliżenie, ponieważ stwierdzają oni jasno, iż „Wszechświat widziany w kosmologicznej skali odległości nie jest dokładnie *FLRW*”³¹.

Łatwo dostrzec, iż podejście *FLRW* do uprawiania kosmologii jest raczej trudne do przyjęcia dla zwolenników kosmologii obserwacyjnej, starających się wprawdzie ocenić realne znaczenie obserwacji w kosmologii. Nie jest to zadanie łatwe i napotyka na wiele problemów, jak np. trudności z oceną zniekształcenia obrazu obiektów, czy też pomiar ruchów własnych odległych obiektów (galaktyk i kwazarów). Te same trudności występują oczywiście również i w ujęciu *FLRW*, ale przyjmowane tutaj założenia, dotyczące geometrii przestrzeni, do pewnego stopnia maskują te trudności. Ponieważ w ramach programu Ellisa unika się przyjmowania tego typu założeń, dokładne analizy pozwalają ocenić realne znaczenie różnych obserwacji i wskazują, gdzie mogą się znajdować różnego rodzaju nieokreśloności.

Autorzy omawianego tutaj artykułu nie proponują swego ujęcia jako alternatywy wobec ujęcia standardowego. Według G. F. R. Ellisa, W. R. Stoegera i innych badaczy, rozwijających program kosmologii obserwacyjnej, te dwa podejścia do kosmologii winny być raczej uważane za **komplemen-**

modelu inflacyjnego pisze np. T. Michnikowski, *Zarys historii modelu inflacyjnego*, [w:] M. Heller i Z. Golda (red.), *Filozofia i kosmologia*, Kraków: PAT-OBI 1994, s. 69.

³⁰Chodzi tutaj o podejście bezpośrednio przedstawione w par. 1.

³¹D. R. Matravers, G. F. R. Ellis i W. R. Stoeger, dz. cyt., s. 36.

tarne, ponieważ dają różny wgląd i różne informacje na temat natury Wszechświata³².

Na czym ma polegać owa komplementarność różnych ujęć w ramach kosmologii? Istnieje tutaj wiele możliwości, z których wspomnę tylko dwie. Według pierwszej z nich podejścia obserwacyjne i standardowe winny rozwijać własne programy badawcze, konfrontując ciągle swe osiągnięcia i usiłując je wykorzystać. Praktyczna realizacja tego podejścia polegałaby na założeniu, iż Wszechświat jest prawie-*FLRW* (model będący liniową perturbacją modelu *FLRW*) i następnie na próbach dopasowania tego modelu do obserwacyjnej mapy Wszechświata uzyskanej w ramach podejścia Ellisa, co też pozwoliłoby na określenie skali odległości, na której Wszechświat staje się prawie-*FLRW*. Innymi słowy podejście to umożliwiłoby precyzyjne określenie znaczenie terminu „prawie” w sformułowaniu „Wszechświat jest prawie-*FLRW*” (problem ten określanany jest też mianem problemu najlepszego dopasowania (*the Best Fitting Problem*)).

Druga możliwość jest pewnym uogólnieniem pierwszej i opiera się na zaproponowanym przez G. F. R. Ellisa — w nieco innym kontekście — rozróżnieniu, dotyczącym trzech różnych podejść do kosmologii. Otóż, jak to już było powiedziane, badania prowadzone w ramach programu Ellisa zmierzają do określenia geometrii na stożku $L - (q)$ i ewentualnie wewnątrz tego stożka (**podejście obserwacyjne**). Oprócz tego podejścia G. F. R. Ellis wyróżnia jeszcze **podejścia astrofizyczne** i **teoretyczne**.

W ramach podejścia astrofizycznego podejmowane są próby określenia warunków w pobliżu linii świata obserwatora, aż do wczesnych momentów historii Wszechświata. Podejście teoretyczne do kosmologii (ściśle biorąc jeden z elementów składowych podejścia standardowego) zmierza natomiast do określenia warunków początkowych historii Wszechświata oraz badania konsekwencji ich przyjęcia w późniejszej ewolucji Wszechświata.

Podejścia te skupiają się na różnych aspektach kosmologii i w zasadzie mogą być używane niezależnie do określania warunków panujących wewnątrz stożka $L - (q)$. Porównanie rezultatów uzyskanych dzięki tym trzem podejściom pozwala — zdaniem Ellisa — na maksymalnie efektywne wykorzystanie dostępnych obserwacyjnych i teoretycznych danych.

³²Tamże, s. 29.

5. Program Ellisa — próba syntezy

Z metodologicznego punktu widzenia program kosmologii obserwacyjnej G. F. R. Ellisa jest zjawiskiem ważnym dla kosmologii współczesnej. A jest tak z czterech powodów.

(1) Program Ellisa jasno i wyraźnie przypomina kosmologom, iż metafizyka jest nieodzowną składową każdej refleksji dotyczącej globalnej struktury Wszechświata. Wielu kosmologów zapomina o tym fakcie, traktując niektóre modele jako bezdyskusyjne i — w przyjętym tutaj znaczeniu terminu „metafizyka” — niemetafizyczne, określając jednocześnie ujęcia alternatywne jako nienaukowe³³.

(2) Program Ellisa nie ogranicza się jedynie do przypomnienia podstawowej kondycji uprawiania kosmologii, lecz podejmuje (z powodzeniem) ścisłą analizę tego co metafizyczne (założone), i tego, co obserwowane w kosmologii. Jednak analizy te prowadzą co najwyżej do obserwacyjnej mapy Wszechświata. Taki model kosmologiczny ma wyłącznie charakter opisowy i nie jest w stanie wyjaśnić tego, co wyjaśnia np. standardowy model kosmologiczny. Stąd też można mówić o pewnej niekompletności programu kosmologii obserwacyjnej, pomimo wielu ważnych jego osiągnięć.

(3) Standardowy model Wszechświata (i nie tylko on) zawdzięcza swą „moc” wyjaśniającą zwłaszcza zastosowaniu wyników współczesnej fizyki do opisu tych etapów ewolucji Wszechświata, z których nie dociera do nas żaden obserwowalny sygnał. Taki sposób postępowania doprowadził do wyjaśnienia niektórych obserwowanych zjawisk we Wszechświecie (chodzi mi tutaj zwłaszcza o promieniowanie tła), stąd też nie bez przesady traktuje się owe bardzo wczesne stadia ewolucji Wszechświata jako swoiste laboratorium fizyki współczesnej³⁴. Jest to jeden z zasadniczych powodów sukcesu modelu standardowego, ale jest to też i jego słabość. Bowiem fakt, iż w laboratorium fizyki są pierwsze etapy ewolucji Wszechświata, prowadzi do sytuacji, w której proponowane są różne modele, nawiązujące do paradygmatu standardowego i dające te same wyniki, gdy chodzi o prawie 15 miliardów lat ewolucji Wszechświata, ale zdecydowanie różniące się w opisie pierwszych chwil jego istnienia. Starczy tutaj wspomnieć np. teorię twi-

³³Tamże, s. 34.

³⁴Zob. np. Y. B. Zeldovich, *The Universe as a Hot Laboratory for Particle and Nuclear Physics*, „Comments on Astrophysics and Space Physics” 2 (1970), s. 12 oraz S. Bergia, dz. cyt., s. 227–246.

storów J. Penrose'a i model Hartlego–Hawkinga³⁵. Modele te, jak słusznie zauważył W. Drees, mogą być określone jako „logicznie niekompatybilne, ale empirycznie równoważne”³⁶.

Owa „empiryczna równoważność” dotyczy właśnie tego obszaru, w którym operuje kosmologia obserwacyjna. I to właśnie tutaj otwiera się możliwość interesującej i owocnej współpracy pomiędzy dwoma różnymi podejściami do uprawiania kosmologii: podejściem standardowym i podejściem obserwacyjnym. O ile bowiem podejście standardowe może zyskać wiele, wykorzystując analizy obserwacji dokonane w ramach podejścia Ellisa, o tyle kosmologia obserwacyjna, dzięki odwołaniu się do niektórych aspektów modeli standardowych, może zwiększyć swą „moc” wyjaśniania. Jednym z możliwych sposobów takiej współpracy pomiędzy tymi różnymi ujęciami uprawiania kosmologii jest podejście komplementarne opisane w par. 4.

(4) Z metodologicznego punktu widzenia komplementarność w powyższym sensie prowadzi do powstania nowej tradycji badawczej. Ta nowa tradycja badawcza w ramach kosmologii współczesnej nie jest jeszcze szeroko akceptowana, lecz wydaje się, iż jej znaczenie może wzrosnąć, zwłaszcza, gdyby miały uzyskać potwierdzenie odstępstwa od jednorodności w wielkoskalowym rozkładzie materii. Tradycja, o której tutaj mowa — inspirując się bezpośrednio programem kosmologii obserwacyjnej G. F. R. Ellisa — w ostatecznym rozrachunku rodzi się z prób ścisłego rozwiązania problemu obserwacji w ramach kosmologii współczesnej — problemu, który może być uważany za istotny problem koncepcyjny w ramach tradycji modelu standardowego. Myślę, iż przyczynienie się do powstania tej nowej kosmologicznej tradycji badawczej stanowi jedno z najistotniejszych osiągnięć programu G. F. R. Ellisa.

³⁵Zob. R. Penrose, *Twistor Quantization and the Curvature of Spacetime*, „The International Journal of Theoretical Physics” 1 (1968), s. 61 oraz J. B. Hartle i S. W. Hawking, dz. cyt.

³⁶„Logically incompatible but empirically equivalent” (W. B. Drees, *Philosophical Elements in Penrose's and Hawking's research in Contemporary Cosmology*, „Philosophy in Science” 4 (1990), s. 13). Gdy chodzi o obszar „niekompatybilności” wspomnianych modeli kosmologicznych, to wydaje się, iż należałoby go poszerzyć, włączając doń kwestię powstawania galaktyk (lub szerzej: struktur) we Wszechświecie (na ten temat zob. np. P. J. E. Peebles i J. Silk, *A Cosmic Book of Phenomena*, „Nature” 346 (1990), s. 233).

Dodatek

komentarz bibliograficzny³⁷

I. Prace zawierające pierwsze sformułowania zagadnienia stanowiącego centralną kwestię programu Ellisa: McCrea 1935 i 1939, Hubble 1937, Kristian i Sachs 1966. Na temat obserwacji w kosmologii z punktu widzenia historii kosmologii zob. np. Heller [i in.] 1989.

II. Prace o charakterze przeglądowym i popularnym, definiujące program oraz przedstawiające jego centralne idee: Ellis i Harrison 1974a–b, Ellis 1975, 1979, 1980a–b, 1984a, 1987a, 1990b i 1995b.

III. Prace należące do zasadniczego nurtu programu i realizujące jego podstawowe cele. W tych pracach znajdują się główne wyniki programu Ellisa. Wypada zacząć od: Ellis i Perry 1979, Ellis, Perry i Sievers 1984 (te dwie prace przedstawiają ścisłą analizę dystorsji wpływających — na ważne z kosmologicznego punktu widzenia — obserwacje galaktyk). Następujące prace tworzą „kanoniczne” opracowania programu Ellisa: Ellis, Nel, Maartens, Stoeger i Whitman 1985 (praca ta, oparta na rozprawach doktorskich S. D. Nela i R. Maartensa przedstawionych na uniwersytecie w Cape Town, składa się z dwóch części często cytowanych jako: *Observational Cosmology I* i *Observational Cosmology II*), Nel 1987, Stoeger 1987, Stewart 1987, Stoeger, Ellis i Nel 1992, Stoeger, Nel i Ellis 1992a–b (ostatnie trzy prace są często cytowane w literaturze jako *Observational Cosmology III–V*; w 1993 r. został dostrzeżony w tych pracach istotny błąd techniczny — został on skorygowany w pracach *Observational Cosmology III–IV* [w:] Maartens, Humphreys, Matravers i Stoeger 1996), Bishop 1993, Maartens i Matravers 1994, Humphreys, Maartens i Matravers 1997.

IV. Program kosmologii obserwacyjnej i mikrofalowe promieniowanie tła. Jest to ważna grupa prac interpretująca to niezwykle istotne dla kosmologii współczesnej odkrycie. Zacząć wypada od pracy cytowanej w literaturze jako *Observational Cosmology VI*: Stoeger, Ellis i Xu 1994. W pracy tej została dokonana analiza efektu Sachsa–Wolfe’a we współrzędnych obserwacyjnych. Szczególnie istotne wydają się też być prace dotyczące (prawie-) twierdzenia *EGS*, a zwłaszcza: Stoeger, Maartens i Ellis 1995. Ponadto należy tutaj jeszcze wymienić następujące prace: Stoeger, Ellis i Schmidt

³⁷W niniejszym dodatku przyjęto zasadę cytowania prac przez podanie nazwisk autorów i roku opublikowania pracy. Pozostałe dane bibliograficzne zostały podane w literaturze dodatku.

1991, Ellis i Tavakol 1994, Maartens, Ellis i Stoeger 1995a–b, Maartens, Ellis i Stoeger 1996, Stoeger, Araujo i Gebbie 1997.

V. *The Best Fitting Problem* i kwestia modeli prawie-*FLRW*. Jest to grupa prac pozostających w bliskim związku z programem Ellisa: Ellis 1979, Ellis i Stoeger 1987, Stoeger, Nel, Maartens i Ellis 1992 (niektóre błędy dostrzeżone w tej pracy są poprawione w: Maartens i Matravers 1994), Bonnor i Ellis 1986, Stoeger, Ellis i Hellaby 1987, Dyer 1987a, Coles i Ellis 1994, Ellis i Rothman 1995.

VI. Kwestie związane z tzw. *gauge choice* w kontekście badań dotyczących izotropowości promieniowania tła i ich ewentualnego zastosowania w programie Ellisa. Jest to względnie nowy nurt badań w ramach programu kosmologii obserwacyjnej, nawiązujący m. in. do kwestii podejmowanych w pracach wymienionych w par. IV i V niniejszego dodatku. Mówiąc ogólnie, chodzi tutaj o następującą kwestię. Otóż kiedy rozpatruje się perturbacje standardowego modelu kosmologicznego, to wówczas napotyka się problem arbitralności, gdy chodzi o określenie samej perturbacji. Przyczyną tego stanu rzeczy jest dowolność wyboru czasoprzestrzeni będącej punktem odniesienia (*gauge*), względem którego definiuje się perturbację odpowiadającą realnej czasoprzestrzeni. W konsekwencji określenie perturbacji zależy od wyboru owej czasoprzestrzeni odniesienia (*density or redshift perturbations are determined by the gauge chosen*). Nadto, w wielu przypadkach, można znaleźć takie określenie czasoprzestrzeni odniesienia, w którym określone perturbacje znikają. Jak więc w powyższej sytuacji uzyskać informacje, mające fizyczne znaczenie, pomimo istniejącej tutaj dowolności wyboru (*the Gauge Problem*)? Ma to szczególne znaczenie w rozważaniach dotyczących odchyłeń od izotropowości w rozkładzie promieniowania tła powodowanych zwłaszcza efektem Sachs–Wolfe’a (wielkoskalowa anizotropia promieniowania tła powodowana niejednorodnością pola grawitacyjnego w perturbowanym modelu *FLRW* — zob. Sachs i Wolfe 1967). Niektóre z poniższych prac pozostają jednak w luźnym związku z centralnym problemem dyskutowanym w ramach programu Ellisa: Ellis i Bruni 1989, Ellis, Hwang i Bruni 1989, Ellis, Bruni i Hwang 1990, Ellis 1990c, Dunsby 1991, Bruni, Ellis i Dunsby 1992, Bruni, Dunsby i Ellis 1992, Bruni i Ellis 1991, Dunsby, Bruni i Ellis 1992, Bruni 1993, Bruni i Lyth 1994, Bruni i Piotrowska 1994, Dunsby i Bruni 1994, Bruni, Matarrese i Pantano 1995a–b, Stoeger, Xu, Ellis i Katz 1995, Bruni, Matarrese, Molleroch i Songo 1997.

VII. Nurt badań dotyczący zagadnienia uśredniania w kosmologii. Chodzi tutaj o fakt, iż opisując Wszechświat, badacze zwykle odnoszą się do

wielkości uśrednionych na wielkie odległości czy obszary. Ponadto różne opisy odnoszą się do różnych „skal” uśredniania. W związku z tym rozwiązania równań Einsteina — włączając w to rozwiązania w ramach modelu *FLRW* — winny być interpretowane ze szczególną ostrożnością. Wiadomo bowiem, iż równania pola są słuszne (z bardzo dużą dokładnością) w układzie słonecznym i w podwójnych układach gwiazd. Nie wiadomo jednak, czy zastosowanie tychże równań w sytuacji, w której dokonuje się jednocześnie uśrednienia w dużej skali, jest tak samo dokładne. Być może w powyższych okolicznościach (a są to *par excellence* okoliczności kosmologiczne) należy uwzględnić w równaniach pola pewne poprawki uwzględniające fakt, iż *de facto* stosowana w kosmologii metryka jest — by tak rzec — metryką uśrednioną. Z podobną sytuacją mamy do czynienia w elektrodynamice, gdzie — w analogicznej sytuacji — wprowadza się tensor polaryzacji. A może tę samą procedurę należy zastosować również i w teorii grawitacji? Ten nurt badań uważany jest za samodzielny i raczej luźno związany z centralnym problemem programu — zob. np.: Ellis 1988 i 1993d, Tavakol i Ellis 1988, Ellis i Matravers 1990 oraz 1993, Zotov i Stoeger 1992 oraz 1995, Carfora i Piotrowska 1995.

VIII. Artykuły przedstawiające inne podejścia w kosmologii, polemizujące z niektórymi z nich (zwłaszcza z modelem inflacyjnym i wyżej wspomnianym podejściem bezpośrednim do kosmologii — modelem *FLRW*), prace dokonujące swoistych „eksperymentów myślowych” w kosmologii: Ellis 1971, Ellis, Maartens i Nel 1978, Ellis 1984a–b, Rothman i Ellis 1985, Ellis i Tivon 1985, Dyer 1987b, Partridge 1987, Ellis 1987b, Ellis i Stoeger 1988, Ellis 1989, 1990a–b i 1991a–b, Ellis, Lyth i Mijic 1991, Ellis i Madsen 1991, Ellis 1993b i 1995a, Coles i Ellis 1994, Matravers i Maartens 1995, Matravers, Ellis i Stoeger 1995.

IX. Opracowania (filozoficzne czy nawet teologiczne) podejmujące zagadnienie granic poznania w dziedzinie kosmologii (i szerzej: w nauce), w których jednak sam program Ellisa pojawia się na dalszym planie — zob. np.: Ellis 1993a i 1993c, Ellis i Stoeger 1993, Ellis i Coule 1994, Ellis 1994 i 1995, Murphy i Ellis 1996.

Literatura dodatku

Wykaz skrótów tytułów czasopism:

Astrophys. J.	The Astrophysical Journal
Class. Quantum Grav.	Classical and Quantum Gravity
Comm. Astrophys.	Comments on Astrophysics and Space Physics
Space Phys.	
G. R. G.	General Relativity and Gravitation
Mon. Not. R. Astr. Soc.	Monthly Notices of the Royal Astronomical Society
Phys. Rev.	Physical Review
Phys. Lett.	Physics Letters
Q. Jl. R. Astr. Soc.	Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society
Z. Ap.	Zeitschrift für Astrophysik.

- Bishop, N. T.**, 1993, *Numerical Relativity: combining the Cauchy and characteristic initial value problems*, „Class. Quantum Grav.” 10, s. 333.
- Bonnor, W. B., Ellis, G. F. R.**, 1986, *Observational Homogeneity of the Universe*, „Mon. Not. R. Astr. Soc.” 218, s. 605.
- Bruni, M.**, 1993, *Stability of Open Universe*, „Phys. Rev. D.” 47, s. 2.
- Bruni, M., Dunsby, P. K. S., Ellis, G. F. R.**, 1992, *Cosmological Perturbations and the Physical Meaning of Gauge-invariant Variables*, „Astrophys. J.” 395, s. 34.
- Bruni, M., Ellis, G. F. R.**, 1991, *Gauge-invariant Conserved Quantities in Almost Robertson-Walker Perturbations*, [w:] R. Cianci, R. de Ritis, M. Francaviglia, G. Marmo, C. Rubano, P. Scudallaro (ed.), *Proceedings of the 9th Italian Conference on General Relativity and Gravitation*, Singapore: World Scientific Pub. Co.
- Bruni, M., Ellis, G. F. R., Dunsby, P. K. S.**, 1992, *Gauge-invariant Perturbations in a Scalar Field Dominated Universe*, „Class. Quantum Grav.” 9, s. 921.
- Bruni, M., Lyth, D. H.**, 1994, *Peculiar Velocity, Cosmic Perturbations Theory, and CMB Anisotropy*, „Phys. Lett. B” 323, s. 118.

- Bruni, M., Matarrese, S., Molleroch, S., Songo, S.,** 1997, *Perturbations of Spacetime: Gauge Transformation and Gauge Invariance at Second Order and Beyond*, „Class. Quantum. Grav.” [w druku].
- Bruni, M., Matarrese, S., Pantano, O.,** 1995a, *Dynamics of Silent Universes*, „Astrophys. J.” 445, s. 958.
- Bruni, M., Matarrese, S., Pantano, O.,** 1995b, *A Local View of the Observable Universe*, „Physical Review Letters” 74, s. 1916.
- Bruni, M., Piotrowska, K.,** 1994, *Dust–radiation Universes: Stability Analysis*, „Mon. Not. R. Astr. Soc.” 270, s. 630.
- Carfora, M., Piotrowska, K.,** 1995, *Renormalizations Group Approach to Relativistic Cosmology*, „Phys. Rev. D” 52, s. 4393.
- Coles, P., Ellis, G. F. R.,** 1994, *The Case of an Open Universe*, „Nature” 370, s. 609.
- Dyer, C.C.,** 1987a, *Gravitational Lenses and the Inhomogeneous Universe*, [w:] W. R. Stoeger (ed.), *Theory and Observational Limits in Cosmology*, Città del Vaticano: Specola Vaticana 1987, s. 325.
- Dyer, C. C.,** 1987b, *An Introduction to Small Universes*, [w:] W. R. Stoeger (ed.), *Theory and Observational Limits in Cosmology*, Città del Vaticano: Specola Vaticana 1987, s. 463.
- Dunsby, P. K. S.,** 1991, *Gauge Invariant Perturbations in Multi–component Fluid Cosmologies*, „Class. Quantum Grav.” 8, s. 1785.
- Dunsby, P. K. S., Bruni, M., Ellis, G. F. R.,** 1992, *Covariant Perturbations in a Multi–fluid Cosmological Medium*, „Astrophys. J.” 395, s. 54.
- Dunsby, P. K. S., Bruni, M.,** 1994, *General Conserved Quantities in Perturbed Inflationary Universes*, „International Journal of Modern Physics D” 3, s. 443.
- Ellis, G. F. R.,** 1971, *Topology and Cosmology*, „G. R. G.” 2, s. 7.

- Ellis, G. F. R., 1975, *Cosmology and Verifiability*, „Q. Jl. R. Astr. Soc.” 16, s. 245.
- Ellis, G. F. R., 1979, *The Homogeneity of the Universe*, „G. R. G.” 11, s. 281.
- Ellis, G. F. R., 1980a, *Limits to Verification in Cosmology*, „Annals of the New York Academy of Science” 336, s. 130.
- Ellis, G. F. R., 1980b, *Cosmology, Observational Verification, Certainty, and Uncertainty*, „South African Journal of Sciences” 76, s. 504.
- Ellis, G. F. R., 1984a, *Relativistic Cosmology: Its Nature, Aims and Problems*, [w:] B. Bertotti, F. de Felice, A. Pascolini (ed.), *General Relativity and Gravitation*, Dordrecht–Boston–Lancaster: D. Reidel Publishing Company 1984, s. 215.
- Ellis, G. F. R., 1984b, *Alternatives to the Big Bang*, „Annual Review of Astronomy and Astrophysics” 22, s. 157.
- Ellis, G. F. R., 1987a, *Observational Cosmology after Kristian and Sachs*, [w:] W. R. Stoeger (ed.), *Theory and Observational Limits in Cosmology*, Città del Vaticano: Specola Vaticana 1987, s. 43.
- Ellis, G. F. R., 1987b, *Observational Properties of Small Universes*, [w:] W. R. Stoeger (ed.), *Theory and Observational Limits in Cosmology*, Città del Vaticano: Specola Vaticana 1987, s. 475.
- Ellis, G. F. R., 1988, *Modelling the Real Universe: Fitting and Averaging in Cosmology*, [w:] A. Coley, C. Dyer, T. Tupper (ed.), *Proceedings of the 2nd Canadian Conference on Relativity and High Energy Astrophysics*, Singapore: World Scientific Publishing Company 1988, s. 267.
- Ellis, G. F. R., 1989, *The Expanding Universe: A History of Cosmology from 1917 to 1960*, [w:] D. Howard, J. Stachel (ed.), *Einstein Studies*. Vol. I, *Einstein and the History of General Relativity*, Basel–Boston: Birkhäuser 1989, p. 367.
- Ellis, G. F. R., 1990a, *Innovation, Resistance and Change: the Transition to the Expanding Universe*, [w:] R. Bertotti, R. Balbinot, S. Bergia, A. Messina (ed.), *Modern Cosmology in Retrospect*, Cambridge: Cambridge University Press 1990.

- Ellis, G. F. R.**, 1990b, *Cosmology and Verifiability*, [w:] J. Leslie (ed.), *Physical Cosmology and Philosophy*, New York: Macmillan 1990, s. 113.
- Ellis, G. F. R.**, 1990c, *The evolution of inhomogeneities in expanding Newtonian cosmologies*, „Mon. Not. R. Astron. Soc.” 243, s. 509.
- Ellis, G. F. R.**, 1991a, *Major Themes in the Relation between Philosophy and Cosmology*, „Memorie della Società Astronomica Italiana” 62, s. 553.
- Ellis, G. F. R.**, 1991b, *Standard and Inflation Cosmologies*, [w:] R. Mann, P. Wesson (ed.), *Proceedings of the Banff Summer Research Institute on Gravitation (August 1990)*, Singapore: World Scientific Publishing Company 1991, s. 3.
- Ellis, G. F. R.**, 1993a, *Before the Beginning. Cosmology explained*, London–New York: Boyars/Bowerdean.
- Ellis, G. F. R.**, 1993b, *The Physics and Geometry of the Universe: Changing Viewpoints*, „Q. Jl. R. Astr. Soc.” 34, s. 315.
- Ellis, G. F. R.**, 1993c, *The Theology of Anthropic Principle*, [w:] Robert J. Russell, Nancey Murphy, Chris J. Isham (ed.), *Quantum Cosmology and the Laws of Nature. Scientific Perspectives on Divine Action*, Vatican City State—Berkeley: Vatican Observatory and The Center for Theology and the Natural Sciences 1993, s. 367.
- Ellis, G. F. R.**, 1993d, *Exact and inexact solutions of the Einstein field equations*, [w:] G. F. R. Ellis, A. Lanza i J. Miller, *The Renaissance of General Relativity and Cosmology*, Cambridge: Cambridge University Press 1993, s. 20.
- Ellis, G. F. R.**, 1994, *Philosophies of Science and Cosmology*, [w:] Renato Cristin (rsg.), *Leibniz und die Frage nach der Subjektivität*, Stuttgart: F. Steiner Verlag 1994, s. 213.
- Ellis, G. F. R.**, 1995a, *Modern Cosmology and the Limits of Science*, „Transactions of the Royal Society of South Africa” 50 (1), s. 1.
- Ellis, G. F. R.**, 1995b, *Cosmology in South Africa*, „Astrophysics and Space Science” 230, s. 237.

- Ellis G. F. R., Bruni, M., 1989, *A Covariant and Gauge-invariant Approach to Cosmological Density Perturbations*, „Phys. Rev. D.” 40, s. 1804.
- Ellis G. F. R., Bruni, M., Hwang, J., 1990, *Density Gradient-Vorticity Relation in Perfect Fluid Robertson-Walker Perturbations*, „Phys. Rev. D.” 42, s. 1035.
- Ellis, G. F. R., Coule, D. H., 1994, *Life at the end of the universe?*, „G. R. G.” 26, s. 731.
- Ellis, G. F. R., Harrison, E. R., 1974a, *Cosmological Principles I. Symmetry Principles*, „Comm. Astrophys. Space Phys.” 6, s. 23.
- Ellis, G. F. R., Harrison, E. R., 1974b, *Cosmological Principles II. Physical Principles*, „Comm. Astrophys. Space Phys.” 6, s. 29.
- Ellis G. F. R., Hwang, J., Bruni, M., 1989, *A Covariant and Gauge-invariant Perfect Fluid Robertson-Walker Perturbations*, „Phys. Rev. D.” 40, s. 1819.
- Ellis, G. F. R., Lyth, D. H., Mijić, M. B., 1991, *Inflationary models with $\Omega \neq 1$* , „Phys. Lett. B.” 271, s. 52.
- Ellis, G. F. R., Maartens, R., Nel, S. D., 1978, *The Expansion of the Universe*, „Mon. Not. R. Astr. Soc.” 184, s. 439.
- Ellis, G. F. R., Madsen, M. S., 1991, *Exact scalar field in cosmologies*, „Class. Quantum Grav.” 8, s. 667.
- Ellis G. F. R., Matravers, D. R., 1990, *A note on the evolution of anisotropy in a Robertson-Walker cosmology*, „Class. Quantum Grav.” 7, s. 1869.
- Ellis G. F. R., Matravers, D. R., 1993, *Inhomogeneity and anisotropy generations on FRW cosmology*, [w:] B. L. Hu, M. P. Ryan Jr. i C.V. Vishveshwara (ed.), *International Symposium on Directions in General Relativity*. Vol 1. *Papers in Honor of Charles Misner*, College Park, MD (USA), Cambridge: Cambridge University Press 1993, s. 90.

- Ellis, G. F. R., Nel, S. D., Maartens, R., Stoeger, W. R., Whitman, A. P.**, 1985, *Ideal Observational Cosmology*, „Physical Reports” 124, s. 315.
- Ellis, G. F. R., Perry, J. J.**, 1979, *Towards a «Correctionless» Observational Cosmology*, „Mon. Not. R. Astr. Soc.” 187, s. 357.
- Ellis, G. F. R., Perry, J. J., Sievers, A. W.**, 1984, *Cosmological Observations of Galaxies: the Observational Map*, „Astronomical Journal” 89, s. 1124.
- Ellis G. F. R., Rothman, T.**, 1995, *Past Light Cone Shape and Refocusing in Cosmology*, „American Journal of Physics” 63, s. 88.
- Ellis, G. F. R., Stoeger, W. R.**, 1987, *The «Fitting Problem» in Cosmology*, „Class. Quantum Grav.” 4, s. 1697.
- Ellis, G. F. R., Stoeger, W. R.**, 1988, *Horizons in Inflationary Cosmology*, „Class. Quantum Grav.” 5, s. 207.
- Ellis, G. F. R., Stoeger, W. R.**, 1993, *Introduction to General Relativity and Cosmology*, [w:] R. J. Russell, N. Murphy i Ch.J. Isham (ed.), *Quantum Cosmology and the Laws of Nature. Scientific Perspectives on Divine Action*, Vatican City State—Berkeley: Vatican Observatory and The Center for Theology and the Natural Sciences 1993, s. 33.
- Ellis, G. F. R., Tavakol, R.**, 1994, *Geodesic Instability and the Isotropy of the CMWBR*, „Class. Quantum Grav.” 11, s. 675.
- Ellis, G. F. R., Tivon, G.**, 1985, *Astronomical Tests of the Inflationary Universes and Others Cosmologies*, „Observatory” 105, s. 189.
- Heller, M., Flin, P., Golda, Z., Maślanka, K., Ostrowski, M., Rudnicki, K., Sierotowicz, T.**, 1989, *Observational Cosmology: From Gauss to Sandage*, „Acta Cosmologica” 16, s. 87.
- Hubble, E.**, 1937, *The Observational Approach to Cosmology*, Oxford: Clarendon Press.
- Humphreys, N. P., Maartens, R., Matravers, D. R.**, 1997, *Anisotropic Observations in Universes with Nonlinear Inhomogeneity*, „Astrophys. J.” 477, s. 47.

- Kristian, J., Sachs, R. K.**, 1966, *Observations in Cosmology*, „Astrophys. J.” 143, s. 379.
- Maartens, R., Ellis, G. F. R., Stoeger, W. R.**, 1995a, *Limits on Anisotropy and Inhomogeneity from the Cosmic Background Radiation*, „Phys. Rev. D.” 51 (4), s. 1525.
- Maartens, R., Ellis, G. F. R., Stoeger, W. R.**, 1995b, *Improved Limits on Anisotropy and Inhomogeneity from the Cosmic Background Radiation*, „Phys. Rev. D.” 51 (10), s. 5942.
- Maartens, R., Ellis, G. F. R., Stoeger, W. R.**, 1996, *Anisotropy and Inhomogeneity of the Universe from $\Delta T/T$* , „Astronomy and Astrophysics” 309, s. L7.
- Maartens, R., Humphreys, N. P., Matravers, D. R., Stoeger, W. R.**, 1996, *Inhomogeneous Universes in Observational Coordinates*, „Class. Quantum Grav.” 13, s. 253 (errata w: „Class. Quantum Grav.” 13 (1996), s. 1689).
- Maartens, R., Matravers, D. R.**, 1994, *Isotropic and Semi-isotropic Observations in Cosmology*, „Class. Quantum Grav.” 11, s. 2693.
- Maartens, R., Matravers, D. R.**, 1995, *Comment on standard cosmology*, [w:] F. Occhionero (ed.), *International Workshop: Birth of the universe and fundamental physics*, Berlin: Springer Verlag 1995, s. 135.
- Matravers, D. R., Ellis, G. F. R., Stoeger, W. R.**, 1995, *Complementary Approaches to Cosmology: Relating Theory to Observations*, „Q. Jl. R. Astr. Soc.” 36, s. 29.
- McCrea, W. H.**, 1935, „Observable Relations in Relativistic Cosmology”, *Z. Ap.*, 9, s. 290.
- McCrea, W. H.**, 1939, *Observable Relations in Relativistic Cosmology*, *Z. Ap.*, 18, s. 98.
- Murphy, N., Ellis, G. F. R.**, 1996, *On the Moral Nature of the Universe: Theology, Cosmology, and Ethics*, Minneapolis: Fortress Press.

- Nel, S. D.**, 1987, *Ideal Observational Cosmology*, [w:] W. R. Stoeger (ed.), *Theory and Observational Limits in Cosmology*, Città del Vaticano: Specola Vaticana 1987, s. 255.
- Partridge, R. B.**, 1987, *Observational Constrains on «Small Universes»*, [w:] W. R. Stoeger (ed.), *Theory and Observational Limits in Cosmology*, Città del Vaticano: Specola Vaticana 1987, s. 487.
- Rothman, T., Ellis, G. F. R.**, 1985, *Metaflation?*, University of Cape Town Preprint 85/18 (tekst ten ukazał się w: „Astronomy” 15 (1987), no. 2; tłumaczenie polskie w: „Postępy Astronomii” 35 (1987), z. 3, s. 169).
- Sachs, R. K., Wolfe, A. M.**, 1967, *Perturbations od a Cosmological Model and Angular Variations of the Microwave Background*, „Astrophys. J.” 147, s. 73.
- Stewart, J. M.**, 1987, *Numerical Cosmology*, [w:] W. R. Stoeger (ed.), *Theory and Observational Limits in Cosmology*, Città del Vaticano: Specola Vaticana 1987, s. 307.
- Stoeger, W. R.**, 1987, *Almost FLRW Observational Cosmology*, [w:] W. R. Stoeger (ed.), *Theory and Observational Limits in Cosmology*, Città del Vaticano: Specola Vaticana 1987, s. 275.
- Stoeger, W. R., Araujo, M. R., Gebbie, T.**, 1997, *The Limits on Cosmological Anisotropies from COBE Data*, „Astrophys. J.” 476, s. 435.
- Stoeger, W. R., Ellis, G. F. R., Hellaby, C.**, 1987, *The Relationship Between Continuum Homogeneity and Statistical Homogeneity in Cosmology*, „Mon. Not. R. Astr. Soc.” 226, s. 373.
- Stoeger, W. R., Ellis, G. F. R., Nel, S. D.**, 1992, *Observational Cosmology: III. Exact Spherically Symmetric Dust Solutions*, „Class. Quantum Grav.” 9, s. 509.
- Stoeger, W. R., Ellis, G. F. R., Schmidt, B. G.**, 1991, *Gauge-invariant Variations in the Redshift and Cosmic Background Anisotropies*, „G. R. G.” 23, s. 1196.

- Stoeger, W. R., Ellis, G. F. R., Xu, C.–M.**, 1994, *Observational Cosmology: VI. The Microwave Background and the Sachs–Wolfe Effect*, „Phys. Rev. D” 49, s. 1845.
- Stoeger, W. R., Maartens, R., Ellis, G. F. R.**, 1995, *Proving almost–homogeneity of the Universe: an almost Ehlers–Geren–Sachs Theorem*, „Astrophys. J.” 443, s. 1.
- Stoeger, W. R., Nel, S. D., Ellis, G. F. R.**, 1992a, *Observational Cosmology: IV. Perturbed Spherically Symmetric Dust Solutions*, „Class. Quantum Grav.” 9, s. 1711.
- Stoeger, W. R., Nel, S. D., Ellis, G. F. R.**, 1992b, *Observational Cosmology: V. Solutions of the First–order General Perturbation Equations*, „Class. Quantum Grav.” 9, s. 1725.
- Stoeger, W. R., Nel, S. D., Maartens, R., Ellis, G. F. R.**, 1992, *The Fluid–Ray Formulation of Einstein’s Field Equations*, „Class. Quantum Grav.” 9, s. 493.
- Stoeger, W. R., Xu, C.–M., Ellis, G. F. R., Katz, M.**, 1995, *Gauge Invariance and the Cosmic Microwave Background Radiation Temperature*, „Astrophys. J.” 445, s. 17.
- Tavakol, R., Ellis, G. F. R.**, 1988, *On the Question of Cosmological Modelling*, „Phys. Lett. A” 130, s. 217.
- Zotov, N. V., Stoeger, W. R.**, 1992, *Averaging Einstein’s Equations*, „Class. Quantum Grav.” 9, s. 1023.
- Zotov, N. V., Stoeger, W. R.**, 1995, *Averaging Einstein’s Equations over a Hierarchy of Bound and Unbound Fragments*, „Astrophys. J.” 453, s. 574.