

DAMIAN LUTY

(Poznań)

CYKLICZNY OBRAZ ŚWIATA
WE WSPÓŁCZESNEJ KOSMOLOGII.
PRÓBA FILOZOFICZNEJ OCENY
MODELU EKPYROTYCZNEGO
STEINHARDTA I TUROKA

Wprowadzenie

Kosmologia stała się dyscypliną fizyczną dopiero na początku XX-go wieku, wraz z pojawieniem się Ogólnej Teorii Względności (OTW). Sercem OTW są tzw. równania pola Einsteina – w tych równaniach wyrażony jest fundamentalny postulat relatywistycznego ujęcia grawitacji: związek geometrii czasoprzestrzeni z rozkładem mas (konfiguracją materii). Rozwiązywanie tych równań generuje modele, które można odnosić do kontekstów astronomicznych, czy ogólniej – grawitacyjnych. Wiemy dzisiaj, że rozwiązań równań pola jest nieskończenie wiele. Podklasą tych rozwiązań są modele, które opisują Wszechświat jako całość, są to modele globalne. Rozwiązania takie nazywa się modela-

mi kosmologicznymi. Pierwszy taki model został przedstawiony już przez Einsteina w 1917 r¹.

Model Einsteina był statyczny, sam Einstein bowiem początkowo był przekonany, że tylko taki model jest możliwy, ponieważ realizuje on w globalnej skali zasadę Macha², która pełniła rolę jednej z kluczowych motywacji dla Einsteina w tworzeniu OTW. Jednakże zasada Macha została odrzucona, również w kontekście kosmologii: najpierw W. de Sitter znalazł model, w którym komponent materialny nie występuje (rozwiązanie z próżnią), później G. Lemaitre przedstawił dynamiczny model Wszechświata, w którym dochodzi do ewolucji wielkoskalowej struktury Wszechświata – zdefiniowany zostaje czas globalny i zmienny czynnik skali, a także wyłożona zostaje koncepcja początku Wszechświata, później znana jako „Wielki Wybuch”. A. Friedman ujął różne scenariusze przebiegu ewolucji Wszechświata jako rozwiązania równania zwanego teraz równaniem Friedmana. Scenariusze te zależą od rodzaju geometrii, jaka cechuje strukturę Wszechświata w danym rozwiązaniu równania Friedmana. Zaobserwowanie przez E. Hubble’a oddalania się od siebie galaktyk dostarczyło bazy empirycznej dla relatywistycznej kosmologii, w której występuje punkt początkowy i linearna ewolucja Wszechświata. Kosmologia relatywistyczna nie była jedyną dostępną teorią fizyczną ujmującą Wszechświat jako całość. Konkurencyjne wobec niej były chociażby tzw. kosmologie dedukcyjne (np. A. Milne’a³) czy teoria stanu stacjonarnego (F. Hoyle’a, T. Golda, H. Bondiego⁴). Teorie te okazały się jednak nieefektywne w kontekście wyjaśniania promieniowania tła odkrytego w 1964 r. przez A. Penziasa i R.W. Wilsona. Odkrycie to było dużym empirycznym wsparciem dla kosmologii relatywistycznej, tj. modelu dyna-

¹ A. Einstein, *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie*, (w:) Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften, Berlin 1917, s. 142–152.

² Zasada Macha głosi, że struktura geometryczna czasoprzestrzeni całkowicie i jednoznacznie powiązana jest z rozkładem mas we Wszechświecie, okazało się jednak, że ten pogląd nie był słuszny dla OTW. Okazało się bowiem, że masy zaledwie częściowo określają geometrię czasoprzestrzeni.

³ Zob. D. Dąbek, *Kosmologia Edwarda Arthura Milne’a i jej filozoficzne implikacje*, Wydawnictwo KUL, Lublin 2011.

⁴ Zob. S. Weinberg, *Gravitation and Cosmology*. John Whitney & Sons, Nowy Jork 1972, s. 459–463.

micznego z Wielkim Wybuchem i stało się przyczynkiem do uznawania tego modelu za standardowy w badaniach kosmologicznych.

Wraz z przyznaniem kosmologii relatywistycznej pierwszorzędnej roli, pogląd o kierunkowej ewolucji Wszechświata (od osobliwości początkowej, czyli Wielkiego Wybuchu do śmierci cieplnej Wszechświata) również zyskał wyróżnioną pozycję. Niewątpliwie kosmologia relatywistyczna cieszy się największym uznaniem i jest to uzasadnione olbrzymią mocą eksplanacyjną a także, do pewnego stopnia, przewidywalną. Sam model z Wielkim Wybuchem uległ rzecz jasna przeobrażeniom pod wpływem różnych trudności, takich jak problemy z ciemną materią, ciemną energią czy inflacją kosmiczną, nadal jednak pozostaje modelem standardowym.

Linearność czasu związana z kosmologicznym modelem standardowym bierze się, jak wspomniano, z wykorzystania globalnego czasu powiązanego ze zmiennym czynnikiem skali⁵. Czy istnieją modele kosmologiczne, za którymi kryją się zupełnie odmienne intuicje, a w których równie efektywnie da się wyjaśnić zaobserwowane zjawiska i przewidzieć coś nowego? Podejmuje się próby skonstruowania takich modeli z perspektywy teorii, które zamierzone są jako nowe teorie fundamentalne. Nie tylko to – za modelami tymi kryje się odmienna ontologia czasu kosmologicznego, mianowicie obraz świata, w którym Wszechświat istnieje jako wiecznie powtarzający się cykl. Po porażkach kosmologii stacjonarnych/statycznych, dyskusja przeniosła się ze sporu o to, czy Wszechświat istnieje dynamicznie czy też nie, do debaty na temat tego, jaki dokładnie jest ten dynamiczny sposób istnienia Wszechświata. W rezultacie, na

⁵ Warto jednakże odnotować, że możliwość zdefiniowania globalnego czasu wynika z zastosowania bardzo specyficznej metryki – metryki Robertsona-Walkera. W kontekście OTW nie można bowiem mówić o samodzielnym czasie, rozważa się tu czasoprzestrzeń. „Globalny czas” to pewne uporządkowanie – zwane foliacją – czasoprzestrzeni, „jak gdyby” była ona ukierunkowana. Wykorzystuje się do tego różne warunki, by wspomnieć choćby warunek stabilnej przyczynowości. Zasadniczo czasoprzestrzeń nie jest, z zasady, tak dobrze uporządkowana, dlatego mówi się, że model z metryką Robertsona – Walkera jest modelem z wysokim stopniem symetrii. Takie modele są zatem wysoce wyidealizowane, jednakże, jak się okazało, można je efektywnie konkretyzować.

poziomie obrazów świata, powtórzony zostaje antyczny spór o liniowość i cykliczność czasu.

Głównym zadaniem niniejszego artykułu jest analiza jednego z nowszych modeli kosmologicznych w którym dynamiczny (czasowy) sposób istnienia Wszechświata ujęty jest z perspektywy cykliczności – tzw. modelu ekpyrotycznego. W pierwszej części ogólnie opiszę kontekst powstania modelu ekpyrotycznego. W części drugiej przedstawię składniki modelu ekpyrotycznego a także zrekonstruuję scenariusz rozwoju Wszechświata w tym modelu. W części trzeciej dokonam filozoficznej krytyki modelu ekpyrotycznego, głównie z metodologicznej i epistemologicznej perspektywy.

1. Cykliczne modele Wszechświata

Pierwsze modele cykliczne ujmujące Wszechświat jako proces „kołowy” pojawiły się już w latach 30’tych ubiegłego stulecia. Wówczas modele te bazowały przede wszystkim na rozwiązaniach równania Friedmanna, były zatem niczym innym, jak „eksperymentowaniem” z różnymi możliwościami, jakie daje relatywistyczne ujęcie wielkoskalowej struktury Wszechświata. Wspominany już Lemaitre w późniejszej swojej karierze naukowej zaproponował model cykliczny, który nazwał „Wszechświatem feniksowym”⁶, by opisać mechanizmy przemienionych wobec siebie etapów ekspansji i grawitacyjnego kolapsu – była to koncepcja umocowana w ramach ogólniejszej koncepcji kosmologii oscylacyjnej. Została ona jednak szybko odrzucona ze względu na niepożądane konsekwencje obserwacyjne: wymagała superkrytycznej gęstości masy, czego nie udało się uchwycić empirycznie. W 1934 również R. Tolman, twórca termodynamiki relatywistycznej, prowadził badania na gruncie kosmologii oscylacyjnej⁷. Kolejne, już nie bazujące na fizyce relatywistycznej, modele cykliczne, zaproponowane zostały dopiero pod koniec wieku XX. Mowa o modelach oscylacyjnych M. Israelita,

⁶ G. Lemaitre, *L'univers en expansion*, „Annales de la Société scientifique de Bruxelles”, nr 53, 1933, s. 51 – 85.

⁷ R.C. Tolman, *Relativity, Thermodynamics, and Cosmology*. New York: Dover 1987.

N. Rosena⁸ oraz R. Fakira⁹. W 1995 r. przedstawiona została teoria „Big Brunch’u”, gdzie „Brunch” jest żartobliwym zbitkiem słów „Bang” i „Crunch”, czyli początkowej osobliwości uruchamiającej ekspansję i końcowego kolapsu – w myśl tego ujęcia, moment Wielkiego Kolapsu (*Big Crunch*) jest tożsamy z momentem Wielkiego Wybuchu (*Big Bang*)¹⁰.

Model ekpyrotyczny Wszechświata został przedstawiony w pełnej postaci w 2002 r. przez N. Turoka i P. Steinhardta¹¹ na podstawie wcześniejszych prac¹². Słowo „ekpyrotyczny” w nazwie zaczerpnięte jest ze starożytnej kosmologii stoików, w której *ekpurōsis* – „z ognia” – oznaczało moment spopielenia wszystkiego co dotychczas było i wejściu z tych popiołów w nowy cykl istnienia. Oryginalność modelu zasadza się na wykorzystaniu teorii superstrun, a dokładniej – pięciowymiarowej heterotycznej M-teorii ze stanem BPS¹³. Oczywiście, już wcześniej podejmowane były pewne próby odniesienia teorii superstrun do kosmologii, np. w modelu Randall-Sundruma¹⁴. Model ekpyrotyczny jednak, co jest bardzo często podkreślane przez jego autorów, posiada istotną przewagę: ciemna energia nie jest w nim tym, co musi zostać wyjaśnione, lecz jest wbudowana w mechanizm rozwoju Wszechświata¹⁵. Również – w modelu ekpyrotycznym proponuje się rozwiązanie problemu, z którym borykały się poprzednie modele na gruncie kosmologii cyklicznej – problemu podważenia prawa zachowania

⁸ M. Israelit, N. Rosen, *A singularity-free cosmological model in general relativity*, „Astrophysical Journal”, nr 342, 1989, s. 627-634.

⁹ R. Fakir, *General relativistic cosmology with no beginning of time*, <http://arxiv.org/pdf/gr-qc/9810054.pdf> (dostęp: 27.02.2016).

¹⁰ C. Kiefer, H.D. Zeh, *Arrow of time in a recollapsing quantum universe*, „Physical Review D”, nr 51, 1995, s. 4145-4153.

¹¹ P.J. Steinhardt, N. Turok, *A Cyclic Model of the Universe*, „Science”, nr 296, 2002, s. 1436 – 1439.

¹² J. Khoury, B. A. Ovrut, P. J. Steinhardt, N. Turok, *The Ekpyrotic Universe: Colliding Branes and the Origin of the Hot Big Bang*. <http://arxiv.org/pdf/hep-th/0103239v3.pdf>, (dostęp: 27.02.2016).

¹³ Tamże, s. 8.

¹⁴ L. Randall, R. Sundrum, *A Large Mass Hierarchy from a Small Extra Dimension*, „Physical Review Letter”, nr 83, 1999, s. 3370 -3373.

¹⁵ P. J. Steinhardt, N. Turok, *The Cyclic Model Simplified*, <http://arxiv.org/pdf/astro-ph/0404480v1.pdf>, s. 2 (dostęp: 27.02.2016).

wania energii. Problem ten w prostym sformułowaniu oznacza tyle, że modele cykliczne nie są w stanie określić relacji między następującymi po sobie cyklami w taki sposób, aby nie dochodziło do łamania zasady zachowania energii (co oczywiście wychodzi w matematycznych rachunkach, ponieważ empiryczny dostęp do momentu przejścia między cyklami jest niemożliwy). Całkowita „ekpyroza” mianowicie zachodzi nie we wszystkich obszarach kosmicznych, pewne części Wszechświata, jak się postuluje, przetrwają – na ogół mówi się tutaj o czarnych dziurach¹⁶.

Steinhardt i Turok deklarują, że model ekpyrotyczny jest konkurencyjny względem modelu standardowego również ze względu na podejście do zagadnienia inflacji. Zaproponowany przez Alana Gutha model inflacyjny¹⁷ (model standardowy uzupełniony o postulowany mechanizm gwałtownego rozszerzenia się Wszechświata we wczesnej fazie jego istnienia) przede wszystkim miał rozwiązać problemy generowane przez klasyczny model Wielkiego Wybuchu. Skąd wzięła się homogeniczność Wszechświata (jakim sposobem kauzalnie niepowiązane ze sobą regiony Wszechświata są do siebie tak bardzo podobne?), w jaki sposób powstały zaburzenia gęstości odpowiedzialne za anizotropowe obszary kosmicznego promieniowania tła związane z formacją wielkoskalowych struktur (słynne „zmarszczki” na promieniowaniu tła)? Dlaczego, zgodnie z danymi z satelit COBE i WMAP czasoprzestrzeń w największej obserwowanej skali ma płaską geometrię? Wszystkie te pytania wiążą się ze zgromadzonymi danymi empirycznymi i chociaż są one kompatybilne z dynamicznością modelu standardowego, to model ten sam z siebie nie dostarcza jednoznacznej odpowiedzi na pytanie, dlaczego właściwie zaszyły mechanizmy odpowiedzialne za wytworzenie tych obserwowalnych efektów – stąd postulat kosmicznej inflacji. Zdaniem autorów modelu ekpyrotycznego, uzupełnienie modelu standardowego o mechanizm inflacji jest propozycją *ad hoc*.

¹⁶ P. J. Steinhardt, *The Cyclic Theory of the Universe*, <http://physics.princeton.edu/~steinh/vaasrev.pdf>, s. 33, (dostęp: 27.02.2016).

¹⁷ A. H. Guth, *Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems*, „Physical Review D”, nr 23, 1984, s. 347–356.

Model ekpyrotyczny tymczasem nie tłumaczy inflacji – w modelu tym całkowicie się ją usuwa. Podejmowano próby interpretowania modelu inflacyjnego w ramach aparatu matematycznego teorii superstrun, jednakże kończyło się to operowaniem olbrzymimi liczbami: do efektywnej interpretacji inflacji potrzeba było 10^{500} różnego rodzaju obiektów teoriostrunowych¹⁸. Model ekpyrotyczny zatem inaczej tłumaczy wymienione obserwacje: twierdzi się tutaj, że do „ustalenia” takich parametrów doszło nie w toku gwałtownej, wykładniczej ekspansji Wszechświata w pewnym wycinku czasowym po przekroczeniu progu Plancka, lecz przed samym Wielkim Wybuchem, we wcześniejszym cyklu.

Inną motywacją dla Steinhardta i Turoka była również próba odniesienia M-teorii do kosmologii ze względu na nadzieję wykorzystania danych obserwacyjnych, które w jakiś sposób mogłyby przyjąć w sukurs odnośnej teorii; po dzień dzień cierpi ona bowiem na chroniczny brak empirycznych potwierdzeń i testowalnych przewidywań.

2. Scenariusz rozwoju Wszechświata w modelu ekpyrotycznym

Autorzy koncepcji wymieniają trzy kluczowe intuicje stojące za proponowanym modelem, które właściwie zostały już wspomniane:

1. Wielki Wybuch nie jest początkiem czasu, lecz raczej przejściem z jednej fazy ewolucji Wszechświata do następnej.
2. Ewolucja Wszechświata ma charakter cykliczny.
3. Wydarzenia decydujące dla wielkoskalowej struktury Wszechświata miały miejsce podczas fazy powolnej kontrakcji (zapadania się), nie zaś w toku gwałtownej ekspansji (inflacji).¹⁹

Najważniejszymi składnikami ekpyrotycznego scenariusza są tzw. „brany” (ściślej: hiperpłaszczyzny orbifoldowe, uogólnione rozmaitości czasoprzestrzen-

¹⁸ P. J. Steinhardt, N. Turok, *The Cyclic Model...*, wyd. cyt., s. 1.

¹⁹ Tamże, s. 2.

ne, słowo „brana” jest skrótem od słowa „membrana”) oraz równanie stanu $\omega \gg 1$ (gdzie ω jest stosunkiem ciśnienia do energii gęstości). Pozostałe ważne składniki to: stan BPS, przy pomocy którego definiuje się warunki, które występują podczas powolnej kontrakcji (zapadania się Wszechświata pod koniec danego cyklu) oraz przestrzeń AdS, czyli tzw. przestrzeń antydeSitterowska.

Brany są istotnymi elementami M-teorii, wg. której nasz Wszechświat zawiera dwie brany oddzielone od siebie jeszcze jedną, specjalną braną – braną „objętościową”. Częstki obserwowane (kwarki, leptony, bozony, fotony, etc.) znajdują się na jednej branie, tzw. „branie widzialnej” i ich ruch jest ograniczony właśnie tą braną (obrazowo można powiedzieć, że materia widzialna jest „przypisana” do brany). Zdaniem Turoka i Steinhardta, cząstki na drugiej branie są dla nas ciemną formą materii, której nie możemy wykryć w ramach laboratoryjnych poszukiwań cząstek w oparciu o oddziaływania elektroslabe. Każda cząstka znajdująca się na drugiej branie może oddziaływać grawitacyjnie z cząstkami na branie widzialnej, jednak nie może oddziaływać za sprawą sił elektroslabych czy elektrosilnych. Czasoprzestrzeń w branach jest scharakteryzowana jako płaska czasoprzestrzeń Minkowskiego – jest taka zarówno w branie widzialnej jak i ukrytej.

Równanie stanu $\omega \gg 1$ związane jest z potencjałem międzybranowym. Potencjał międzybranowy określany jest jako czynnik decydujący o sposobie przemieszczania się bran coraz bliżej siebie. Steinhardt i Turok twierdzą, że ustalenie takiego stosunku między ciśnieniem a energią gęstości oferuje dokładnie takie same przewidywania dotyczące tworzenia się wielkoskalowych struktur, co model z inflacją, w którym równanie stanu ma postać $\omega \ll -\frac{1}{3}$. W modelu z inflacją takie równanie stanu to konsekwencja traktowania Wszechświata jako opisywalnego przy pomocy równań dotyczących płynów doskonałych²⁰. Zdaniem autorów modelu ekpyrotycznego to właśnie powstrzymywało naukowców od rozważania równania stanu $\omega \gg 1$, ponieważ wynika z niego, że „doskonały płyn” może przekroczyć prędkość dźwięku, co na gruncie fizyki płynów jest oczywiście zabronione.

²⁰ S. Weinberg, dz. cyt., s. 413.

„Dynamika” zbliżania się bran opisywana jest w modelu ekpyrotycznym następująco. Kiedy odległość między branami jest duża to dystans międzybranowy opisywany jest przez specjalne pole z potencjałem atraktorowym, które wyraża dodatnie ciśnienie próżni. Wszechświat, przyspieszając coraz bardziej, „zużywa się” energetycznie i zaczyna wchodzić w fazę powolnej kontrakcji. Wtedy dochodzi do zbliżania się bran, a dodatnie ciśnienie coraz bardziej przechodzi w ciśnienie ujemne. Równanie stanu jest kluczowe, ponieważ „nadzoruje” przejście do fazy kontrakcji, która w modelu jest decydująca: w niej bowiem zachodzą mechanizmy czyniące Wszechświat gładkim, homogenicznym i izotropowym. Równanie stanu $\omega \gg 1$ prowadzi do dokładnie takich samych obserwacji, jakie są w modelu inflacyjnym z $\omega < -\frac{1}{3}$, gdzie jednocześnie ciśnienie gęstości „zmieniające się wzdłuż” potencjału pola skalarnego interpretowane jest jako ciemna energia.

Warunki początkowe modelu ekpyrotycznego (nie chodzi oczywiście o początek Wszechświata jako całości, tylko o warunki „otaczające” przejście z jednego cyklu do następnego) są opisywane jako stan quasi statyczny, supersymetryczny i o niskiej energii. Jest to tzw. stan BPS, który jest homogeniczny i płaski – łączy zatem krzywiznę oraz jednorodność. Wymaga się tu, aby brany były wobec siebie ustawione równolegle. Wskutek fluktuacji kwantowych opisywanych przy pomocy pięciu pól odniesionych do obu bran, z brany ukrytej „powstaje” czy „wydzielona jest” tzw. „brana objętościowa” przemieszczająca się wzdłuż piątego wymiaru (model ekpyrotyczny bazuje na heterotycznej M-teorii typu $E_2 \times E_8$ wykorzystującej 10 wymiarów fizycznych). Nie tyle zatem brana widzialna zderza się z braną ukrytą, co odłączająca się od brany ukrytej brana objętościowa, opisywana przez szereg równań ruchu (na ogół wywodzące się z M-teorii, modelu Randall-Sundruma, ale także równań Lemaitre’a). Brana objętościowa, wg. rachunków, przemieszczając się gromadzi energię kinetyczną która również odgrywa rolę w kolizji z braną widzialną. Oddziaływanie między wzrastającą gęstością i ciśnieniem a braną objętościową powoduje powstawanie „zmarszczek” na tejże branie, na tyle znikomych, że odpowiada obszarom anizotropowym kosmicznego promieniowania tła – taka jest ich geneza na gruncie modelu ekpyrotycznego. Jednocześnie, teoriostrunowe definiowanie pól skalar-

nych prowadzi do efektu „ultralokalności”, w którym „dystrybucja” dominującej jednorodności jest zależna wyłącznie od czasu, parametr przestrzenny jest zaniedbywalny. Kiedy dochodzi do kolizji między branami, temperatura i wyzwolona energia kinetyczna mają skończoną wartość. Jak wiadomo, temperatura (i gęstość) Wielkiego Wybuchu rozważana w standardowym modelu kosmologicznym była nieskończona. Brana objętościowa „gromadzi” energię z pola grawitacyjnego (oddziaływanie z grawitonami), na czym ma zasadzać się spójność modelu ekpyrotycznego z kwantową grawitacją rozwijaną na gruncie M-teorii.

Zderzenie brany objętościowej z braną widzialną skutkuje „wchłonięciem” brany objętościowej, czemu towarzyszy wyzwolenie ogromnej energii w postaci promieniowania. Ten moment kolizji jest właśnie „Wielkim Wybuchem”, momentem „ekpyrotycznym”, zapoczątkowującym fazę ekspansji w której lambda (ciemna energia) nie posiada jeszcze odpowiedniej wartości, aby rozszerzanie się Wszechświata opisywać jako przyspieszone. Dopiero późniejsze, stopniowe rozrzedzanie się materii wprowadza w fazę dominacji ciemnej energii, w której to fazie, zdaniem autorów modelu ekpyrotycznego, obecnie się znajdujemy. Stopniowe ochładzanie się Wszechświata prowadzi dopiero do stanu BPS, nisko-energetycznego, supersymetrycznego, w którym równoległa konfiguracja bran może zapoczątkować kolejną długą fazę kontrakcji i w rezultacie kolejny cykl. Warto zaznaczyć, że przy omawianiu warunków początkowych dotyczących „parametryzowania” kolejnego cyklu (autorzy zdają się nie wypowiadać jednoznacznie, czy możliwe jest sparametryzowanie kolejnego cyklu Wszechświata, który byłby zupełnie odmienny od cyklu, w którym obecnie się znajdujemy) uwzględnia się przede wszystkim równania dla przestrzeni antydeSitterowskiej²¹ (które wykorzystywane są w wczesnej fazie kontrakcji, jeszcze przed wystąpieniem zjawiska ultralokalności) w których materia jest zaniedbywalna. Chociaż energetyczne „zużywanie się” Wszechświata jest klasycznym zagadnieniem termodynamicznym, to zostaje ono włączone do modelu ekpyrotycznego, ale jako coś pochodnego. Entropia sprowadzona jest tu do aspektu działania ciemnej energii, która odpowiada za dynamikę Wszechświata w danym cyklu.

²¹ Jest to pewna ogólna przestrzeń, w której opisuje się położenie bran.

3. Co dalej? Filozoficzne trudności modelu ekpyrotycznego

Model ekpyrotyczny skonstruowany został przede wszystkim po to, aby znaleźć empiryczne odniesienie dla teorii strun (M-teorii właściwie, na której model bazuje) oraz aby dostarczyć alternatywy dla modelu inflacyjnego Gutha. Czy z obu tych podstawowych zadań model ekpyrotyczny się wywiązał? Wydaje się, że raczej namnożył trudności, niż rozwiłkł problemy zastane.

Model ekpyrotyczny przede wszystkim musiał poradzić sobie z już ugruntowanymi danymi obserwacyjnymi i w jakiś sposób je objaśnić. W rezultacie znakomita większość pracy związanej z modelem ekpyrotycznym sprowadziła się do opracowywania matematyczno-formalnego wyłącznie tych zjawisk, które już objaśniał model inflacyjny, wyłączając ciemną energię. Co zatem uderzające, model ekpyrotyczny posiada moc retrognozyjną, tłumaczy przede wszystkim dane już zgromadzone. Równania zaczerpnięte z M-teorii są „ustawiane” tak, aby wartości zgadzały się z wartościami wyznaczonymi obserwacyjnie. Twórcy modelu zatem dokładnie wiedzieli, do jakich parametrów dążyć. Kłopotliwe jest to, że model ten zdaje się mieć bardzo niską moc predykcyjną, tzn. nie przewidywa żadnych nowych zjawisk. Model objaśnia płaskość, jednorodność, izotropowość Wszechświata, kwestię monopoli magnetycznych, efektywnie interpretuje ciemną energię, podobno także w ramach aparatu matematycznego M-teorii daje się wyliczyć wartość promieniowania czarnej dziury, która jest zgodna z wynikami uzyskanymi przez S. Hawkinga. Wszystko to model ekpyrotyczny jakoś wyjaśnia. Frapujące jest jednak, że autorzy modelu ekpyrotycznego wielokrotnie podkreślali, że „na pewno”, w niedalekiej przyszłości, zostaną opracowane doświadczenia specyficzne, które będą ściśle związane z modelem ekpyrotycznym i M-teorią. Steinhardt i Turok powołują się na projekty, które nastąpią dopiero po projektach LISA (Laser Interferometer Space Antenna) i LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory) i które mają wesprzeć równania pól grawitacyjnych opracowanych na gruncie teorii superstrun. Póki co jednak, satelita LIGO została wykorzystana w obserwacjach fal grawitacyjnych, co przyczyniło się do ostatecznego potwierdzenia przewidywań OTW i w konsekwencji do rozpoczęcia nowej epoki w astronomii – epoki obserwacji

przez fale grawitacyjne. W rezultacie pozycja OTW, a więc również kosmologii relatywistycznej, została ponownie wzmocniona. Trudno wobec tego propozycję Steinhardta i Turoka nazywać dojrzałą w kontekście filozofii nauki, jeżeli tylko zgodzić się z rozumieniem „dojrzałej nauki” jako zawierającej teorie, które nie są „skrojone” pod aktualnie dostępne dane, ale dzięki którym można postawić śmiało hipotezy poddające się testom i ewentualnie przechodzącym te testy pomysłnie w odniesieniu do zupełnie nowych zjawisk²².

Czerpanie wyłącznie z już zgromadzonych danych nie tylko prowokuje zarzuty o pewną „niedojrzałość”, ale także wiedzie do pytania o to, dlaczego właściwie należałoby wybrać alternatywę, skoro nie do końca wiadomo jaki jest zysk, gdy zdecydować się na teoriostrunowe wyjaśnienia. Zanim jakiegś „obserwacje specyficzne” zostaną zaproponowane, model ekpyrotyczny wsparty jest na danych, które wykorzystuje także model inflacyjny i obserwacje nie sugerują, który model wybrać. Mamy zatem do czynienia, co autorzy sami zauważają, z sytuacją, w której „póki co” nierównoważne i nieredukowalne do siebie teorie mają taką samą bazę empiryczną, tj. empirycznie są nieodróżnialne. Oczywiście, nie jest możliwe wskazanie żadnego *experimentum crucis*, które rozstrzygnęłoby, którą teorię należy wybrać. W pewnym sensie mamy zatem do czynienia z niejako wymuszonym niedookreśleniem teorii przez dane doświadczenia – po to, aby ukazać, że alternatywa wobec dobrze ugruntowanej w środowisku naukowym teorii jest przynajmniej równie dobrze spójna z danymi empirycznymi. Co ciekawe, ten manewr, zrealizowany *explicite*, pojawił się w ramach opracowań innego modelu kosmologicznego konkurencyjnego wobec modelu standardowego w kosmologii. Idzie o nowsze badania nad modelem Leimatra-Tolmana-Bondiego (LTB) przeprowadzone przez J. Garcia-Bellido i T. Haugbolle²³. Tutaj również niedostatki predykcyjne próbuje się wygładzać pokazując, poprzez analizę bayesiańską, że model LTB jest przynajmniej równoważny modelowi standardowemu, więc nie należy go odrzucać - z racji tego, że jest kompatybilny

²² Zob. H. Putnam, *Mathematics, Matter and Method*, Cambridge University Press, Cambridge 1975.

²³ J. Garcia-Bellido, T. Haugbolle, *Confronting Lemaitre-Tolman-Bondi models with Observational Cosmology*, <http://arxiv.org/pdf/0802.1523v3.pdf>, (dostęp: 27.02.2016).

z danymi. Jednak, jak wspomniałem w kontekście „dojrzałej nauki”, to, jak się zdaje, za mało, aby zdecydować się na alternatywę i np. finansować bardzo niepewne i zarazem bardzo kosztowne obserwacje tylko dlatego, że dana propozycja jest „alternatywna”.

Warto także zapytać, czy model ekpyrotyczny stanowi taką nowalię, na jaką został wykreowany w opinii publicznej (przynajmniej amerykańskiej)²⁴. Źródło bran autorzy wiąże z instantonem S. W. Hawkinga i J. B. Hartle’a²⁵, a więc uwzględniają „powstanie z niczego”, ale nie tyle samego Wszechświata, co bran właśnie (których status ontologiczny jest cokolwiek niejasny). Równania dotyczące momentów poprzedzających kolizję bran, a więc przed Wielkim Wybuchem pojawiały już w pierwszym projekcie teorii strun G. Veneziana i jego współpracowników. Problem przejścia od stanu BPS do jakiegokolwiek ruchu (definiowanego na obiektach teorii strunowych) podejmowany był przez Randall i Sundruma.

Poddając model ekpyrotyczny krytyce z perspektywy filozoficznej, nadmienić można także problematykę heurystyczną związaną z modelem. Frapującym jest, że wszystkie intuicje, które da się wynieść z popularnonaukowych przedstawień koncepcji nie znajdują prawie żadnego zastosowania na poziomie średniozaawansowanym, natomiast intuicje z poziomu drugiego również nie stosują się do poziomu zaawansowanego. Nie jest to problem przemawiania do zdrowego rozsądku – obecnie może wydawać się, że próba apelowania do zdrowego rozsądku w przypadku zagadnień naukowych podpada pod naiwność – co zbyt daleko posuniętych uproszczeń w stosunku do zaawansowania modelu. Nie chodzi również o to, że na poziomie zaawansowanym po prostu pewną znajomość aparatu matematycznego się zakłada. Chyba najbardziej rażącym przykładem jest mówienie na poziomie popularnym o kolizji dwóch bran – podczas gdy właściwie chodzi o przynajmniej trzy brany. Podobnie jest z równaniem stanu $\omega \gg 1$, który także generuje chybione intuicje – wgląd w zaawansowany poziom omawiania modelu ekpyrotycznego jasno pokazuje, że jest on jednym

²⁴ Zob. M. Heller, *Kosmologia kwantowa*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2001, s. 91–97.

²⁵ J. B. Hartle, S. W. Hawking, *Wave function of the Universe*, „Physical Review D”, nr 28, 1983, s. 2960.

z wielu czynników, który dotyczy zresztą warunków w fazie kontrakcji, niewiele zaś mówi o najważniejszym problemie przejście ze stanu BPS do kontrakcji. Okazuje się, że trudności z zaakceptowaniem modelu ekpyrotycznego nie biorą się z jakiegoś dogmatyzmu, ale raczej np. z tego, że wykorzystywany aparat matematyczny jest obliczeniowo nieefektywny, tzn. ze względu na jego złożoność nie da się określić jednoznacznych procedur rozwiązywania równań. Prostota matematyczna z pewnością nie mogłaby służyć jako argument za wybraniem modelu ekpyrotycznego. Co więcej, właśnie z powodu zbyt rozbudowanej i w konsekwencji uginającej się pod własnym ciężarem maszyny matematycznej teorii strun, teoria ta co rusz przechodzi kolejne fundamentalne metamorfozy. Początkowo mieliśmy zwykłą teorię strun, potem teorię superstrun, następnie M-teorię (na której bazują autorzy modelu ekpyrotycznego), obecnie natomiast wśród badaczy zajmujących się *stricte* fizyką fundamentalną dominuje w kontekście teorii strun tzw. podejście AdS/cft (z korespondencją przestrzeni antydessitera i konforemnej teorii pola).

Najbardziej obiecująca wydawała się interpretacja ciemnej energii. Jakkolwiek w równaniach wykorzystanie lambdy daje interesujące twierdzenie, że trzosem czy osią rozwoju Wszechświata jest właśnie ciemna energia, to autorzy niestety nie mają jednolitego stanowiska w odnośnej kwestii. Steinhardt samodzielnie rozwijał inną interpretację ciemnej energii jako „kwintesencji”, czyli nowym, specjalnym polu skalarnym²⁶. Przy pomocy ciemnej energii również, obok odpowiednio zdefiniowanych czarnych dziur, tłumaczy się zachowanie energii w przechodzeniu od cyklu do cyklu, jest to jednak zagadnienie trudne do intuicyjnego wyłożenia. Co również może wydawać się dziwne, Steinhardt i Turok stwierdzają, że to, iż obecnie zaczęliśmy (pośrednio chociażby) przekonywać się o istnieniu ciemnej energii, to żaden przypadek: właśnie znajdujemy się w fazie dominacji ciemnej energii. Trudno oceniać obecnie, na ile postulowana zbieżność naszego odkrycia ciemnej energii z fazą cyklu Wszechświata jest rzeczywiście trafnym ujęciem problemu.

²⁶ P. J. Steinhardt, *A Quintessential Introduction to Dark Energy*, <http://physics.princeton.edu/~steinh/steinhardt.pdf>, (dostęp: 28.02.2016).

Podsumowanie

Mogłoby się zdawać, że formułowane z filozoficznej perspektywy zastrzeżenia wobec śmiałego scenariusza rozwoju Wszechświata w modelu ekpyrotycznym stanowi wyraz pewnego konserwatyizmu, to wrażenie to, jak mi się zdaje, jest błędne. Nie idzie o wypominanie naukowcom, że postępują nieprawidłowo, ale o ostrożność w odniesieniu do prawomocności uznawania jakiegoś obrazu świata. Starałem się pokazać, że są pewne przyczynki do umiarkowanego entuzjazmu wobec ekpyrotycznego modelu Wszechświata, czyli: wobec cyklicznego obrazu świata. Niekoniecznie jednak musi oznaczać to całkowitą porażkę rozważań nad takim obrazem w kontekście współczesnej kosmologii. Ostatecznie, pewne niedostatki modelu ekpyrotycznego pochodzą od teorii, w języku której ten model został sformułowany, czyli M-teorii.

W swoich rozważaniach przedstawiłem kilka problemów, które wydają mi się ważne metodologicznie i epistemologicznie. W dużej mierze bazowały one na zagadnieniu obserwowalności i mocy przewidywczącej. Można by argumentować, że, ostatecznie, propozycje konstruowane w oparciu o jakąś wersję teorii strun w istocie są jednak śmiałymi hipotezami, które jedynie wykraczają obecnie poza możliwości technologiczne. To jednak nie do końca tak, problem bowiem jest głębszy i dotyczy w ogóle kandydatek na nowe teorie fundamentalne, które za jeden z kluczowych celów mają scalenie kwantowej teorii pola i OTW. W ramach żadnej z dotychczasowych teorii nie zdołano opracować pełnej koncepcji tego, co właściwie jest obserwowalne (tj. stosownych operatorów, dzięki którym można by zdefiniować działanie obiektów kwantowych w kontekstach grawitacyjnych). Być może zatem nie należy porzucać ani modelu ekpyrotycznego ani cyklicznego obrazu świata, tylko wyczekiwać dalszych postępów w badaniach nad kwantową grawitacją.

**CYCLIC WORLD-PICTURE IN CONTEMPORARY COSMOLOGY.
A PHILOSOPHICAL EVALUATION OF STEINHARDT'S
AND TUROK'S EKPYROTIC MODEL**

Summary

I present a brief history of cosmology, where I point at a certain class of cosmological models in which the Universe is conceived as an endless cycle of phases evolving in a specific way. Here I state an analogy with the discussion about the status, or rather: the “topology”, of time – is it linear or does it have the structure of a cycle? This leads me to bring up one of the newest concepts in cyclic cosmology – the Ekpyrotic Model. After reconstructing the model and giving a summary of the scenario of how the Universe develops in the Ekpyrotic model, I attempt to criticise it from a philosophical perspective. I make several claims regarding some epistemological and methodological issues. In connection with the Ekpyrotic Model, I discuss problems with under-determination, theory choice and mathematical simplicity.

Keywords: scientific world-views, cosmology, Ekpyrotic model, cyclic and linear time

Słowa kluczowe: naukowe obrazy świata, kosmologia, model ekpyrotyczny, czas cykliczny i linearny

Bibliografia

- Dąbek D., *Kosmologia Edwarda Arthura Milne'a i jej filozoficzne implikacje*, Lublin 2011.
- Einstein A., *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie*, (w:) Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften, Berlin 1917, s. 142–152.
- Fakir R., *General relativistic cosmology with no beginning of time*, <http://arxiv.org/pdf/gr-qc/9810054.pdf> (dostęp: 27.02.2016).
- Guth A. H., *Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems*, „Physical Review D”, nr 23, 1984, s. 347–356.
- Garcia-Bellido J., Haugbolle T., *Confronting Lemaitre-Tolman-Bondi models with Observational Cosmology*, <http://arxiv.org/pdf/0802.1523v3.pdf>, (dostęp: 27.02.2016).
- Hartle J.B., Hawking S.W., *Wave function of the Universe*, „Physical Review D”, nr 28, 1983, s. 2960-2975.
- Heller M., *Kosmologia kwantowa*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2001.
- Israelit M., Rosen N., *A singularity-free cosmological model in general relativity*, „Astrophysical Journal”, nr 342, 1989, s. 627–634.
- Kiefer C., Zeh H.D., *Arrow of time in a recollapsing quantum universe*, „Physical Review D”, nr 51, 1995, 4145–4153.

- Khoury J., Ovrut B.A., Steinhardt P.J., Turok N., *The Ekpyrotic Universe: Colliding Branes and the Origin of the Hot Big Bang*. <http://arxiv.org/pdf/hep-th/0103239v3.pdf>, (dostęp: 27.02.2016).
- Lemaitre G., *L'univers en expansion*, „Annales de la Société scientifique de Bruxelles”. nr 53, 1933, s. 51 – 85.
- Putnam H., *Mathematics, Matter and Method*, Cambridge University Press, Cambridge 1975.
- Randall L., Sundrum R., *A Large Mass Hierarchy from a Small Extra Dimension*, „Physical Review Letter”, nr 83, 1999, s. 3370 -3373.
- Steinhardt P.J., Turok N., *A Cyclic Model of the Universe*, „Science” nr 296, 2002, s. 1436–1439.
- Steinhardt P.J. , Turok N., *The Cyclic Model Simplified*, <http://arxiv.org/pdf/astro-ph/0404480v1.pdf>, (dostęp: 27.02.2016).
- Steinhardt, P.J. *The Cyclic Theory of the Universe*, <http://physics.princeton.edu/~steinh/vaasrev.pdf>, (dostęp: 27.02.2016).
- Steinhardt P.J. , *A Quintessential Introduction to Dark Energy*, <http://physics.princeton.edu/~steinh/steinhardt.pdf>, (dostęp: 28.02.2016).
- Tolman R.C., *Relativity, Thermodynamics, and Cosmology*. New York: Dover 1987.
- Weinberg S., *Gravitation and Cosmology*. John Whitney & Sons, Nowy Jork 1972.

Mgr Damian Luty

Instytut Filozofii, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu.

Absolwent i doktorant w Instytucie Filozofii UAM