

Program badawczy kosmologii kwantowej

Marek Szydłowski

Zakład Fizyki Teoretycznej, Wydział Filozofii KUL Lublin

Centrum Układów Złożonych Marka Kaca IF UJ Kraków

Streszczenie

W pracy pokazujemy, że wysiłki zmierzające do konstrukcji kosmologii kwantowej i w ogólności kwantowej teorii grawitacji można zrozumieć w języku metodologii programów badawczych Imre Lakatosa. Zdefiniujemy przedzień teorii sformułowany z najogólniejszych zasad, tak aby objąć różnorodność podejść. Do hipotez przedzenia zaliczymy dwie hipotezy: kwantowej natury świata oraz jego opisu w terminach równań różniczkowych dyskretnych czy ciągłych. Dokonamy próby rekonstrukcji twardego rdzenia programu, tj. wiedzy zastanej z teorii grawitacji i teorii kwantowej. Wykażemy, że wczesne próby konstrukcji teorii kwantowej grawitacji i kosmologii oparte na koncepcji funkcji falowej dla Wszechświata (podejście Hawkinga-Hartle'a) posiadają cechę programu badawczego heurystycznie postępowego lecz teoretycznie degenerującego się. Na analizowanym przykładzie pokażemy, że degenerującego programu badawczego nie należy zarzucać i podamy przykłady hipotez ożywiających ten program (koncepcja Ambjorna, Loll, Jurkiewicza kauzalnych triangulacji dynamicznych). Wskażemy również na hipotezy należące do pasa ochronnego (hipoteza pętlowej grawitacji, kwantowanie kanoniczne, koncepcja zbiorów kauzalnych). Będziemy argumentować, że heurystyka pozytywna programu badawczego kosmologii kwantowej i w ogólności kwantowej teorii grawitacji będzie się wiązać z modyfikacjami hipotez należących do pasa ochronnego. Pokażemy, że Feyerabenda anarchizm metodologiczny znajduje odzwierciedlenie w przypadku badanego programu. Wskażemy konkretny przykład jakim jest kwantowa teoria dynamicznych triangulacji Ambjorna, Loll i Jurkiewicza będąca argumentem za niezarzucaniem programu. Pokazujemy, że program kwantowej grawitacji (kosmologii kwantowej) jest to program rozwijający się (niedojrzały w naszej terminologii), którego nie należy zarzucać.

1. Wstęp

Koncepcję Imre Lakatosa filozofii nauki należy rozumieć jako pewną próbę rozwiązania problemu rewizji wiedzy zastanej będącą pewną korektą falsyfikacjonizmu [1]. Lakatos, za Popperem, naukę traktował jako nieustający konkurs hipotez, którym stawia się coraz to nowe zadania [2, s.81]. Przedmiotem oceny metodologicznej są nie tyle pojedyncze hipotezy, co ich zespoły – naukowe programy badawcze w jego terminologii. Program badawczy uznajemy za wartościowy jeśli jest konsystentny – co stwarza możliwość określonego projektu badań przyszłych oraz jeśli jest efektywny – otwiera możliwości odkrywania nowych zjawisk. Heurystyka negatywna programu polega na tym, że istnieje pewien nienaruszalny i нефalsyfikowalny zbiór założeń i hipotez – twardy rdzeń (hard core). Do twardego rdzenia należy włączyć bez krytyki nie tylko założenia naukowe, ale również metodologiczne i metafizyczne (Lakatos opiera się na popperowskiej koncepcji metafizycznych programów dla nauki [2]). Z kolei heurystyka pozytywna polega na koncepcji rozwoju programu badawczego. Heurystyka pozytywna określa w jaki sposób możemy rozwijać program badawczy wraz z technikami matematycznymi i eksperymentalnymi. W odróżnieniu od twardego rdzenia, tzw. pas ochronny (projective belt) ulega modyfikacji i rewizji poprzez heurystykę pozytywną programu. Lakatos pisze: „Pozytywna heurystyka składa się z częściowo sformułowanych sugestii i wskazówek, w jaki sposób można zmieniać i rozwijać ‘obalone warianty’ programu badawczego, w jaki sposób modyfikować, udoskonalać ‘obalony pas ochronny’ [3].

Przykładem twardego rdzenia programu badawczego mechaniki jest założenie, że orbity planet zależą od prawa grawitacji zastosowanego do układu dwóch ciał (prawa Keplera). Heurystyka pozytywna polega na uwzględnieniu oddziaływania pomiędzy pozostałymi planetami, a nie tylko w układzie planeta – Słońce, traktowaniu ich jako bryły sztywne, itd. [2, s.82]. Z kolei Alan Chalmers uważa, że programem badawczym jest raczej program mechaniki Newtonowskiej zaproponowany w XVIII i XIX stuleciu jako ogólny i spójny program wyjaśniania Wszechświata z użyciem pojęć i praw mechaniki Newtonowskiej oraz Newtonowskiej teorii grawitacji [4]. Wydaje się jednak, że ten sam program adresowany do układu planetarnego można nazwać również programem badawczym, czy też jego aplikacją w określonej dziedzinie.

Tak jak podkreślaliśmy, twardy rdzeń jest z definicji нефalsyfikowalny z powodu metodologicznej decyzji jego zwolenników [1, s.133]. Natomiast jeśli pojawią się

niezgodności pomiędzy danym programem badawczym i danymi obserwacyjnymi, to należy zmienić elementy struktury teoretycznej należące do jej pasa ochronnego. Pozytywna heurystyka jest tą częścią programu badawczego, która mówi uczonemu co winien zrobić, aby wprowadzić odpowiednie korekty do samego rdzenia, aby program rozwijać i udoskonalać [1, s.135]. Lakatos podkreśla, że wzbogacony pas ochronny to nie tylko pomocnicze hipotezy lecz także nowe techniki matematyczne, czy też techniki weryfikacji eksperymentalnej [1, s.145-146]. Lakatos tłumaczy ten fakt na przykładzie Newtonowskiej Teorii Grawitacji (w jej wczesnej fazie rozwoju) a początkiem jej aplikacji do układu planetarnego (mechaniki niebieskiej). Aby możliwe było takie przejście należało wziąć pod uwagę to, że planety posiadają skończone rozmiary, kształt kulisty, czy też rotują wokół własnej osi. Należało również rozwiązać problem oddziaływania grawitacyjnego pomiędzy planetami i wyjść poza idealizacyjne założenie, że Słońce – planeta o dominującej masie wywiera jedyny wpływ na ruch planet w Układzie Słonecznym. Dopiero wówczas Newton zaczął się troszczyć o zgodność otrzymanych wyników teoretycznych z obserwacją. Jest to przykład heurystyki pozytywnej. Lakatos przeprowadził analogiczną identyfikację pasa ochronnego na przykładzie teorii atomu Bohra [1, s.140-145]. Wtedy również zwraca on uwagę, że na wczesnym etapie rozwoju weryfikacja empiryczna nie jest tak ważna, ponieważ teoretycznym badaniom daje się szansę pokazania (w możliwie nieskrępowany sposób) jej możliwości. Lakatos trafnie zauważa, że to, czego przede wszystkim wymagamy od programu badawczego, to odniesienie jakichś spektakularnych sukcesów, czy też nowatorskich predykcji. Jest to bardzo interesujące spostrzeżenie, które w pełni znajdzie odbicie w przypadku programu kosmologii kwantowej i w ogólności kwantowej teorii grawitacji. Analizowany przez nas program badawczy zawiera „niedojrzały” pas ochronny znajdujący się dopiero na etapie osiągania pierwszych spektakularnych sukcesów i zbliżający się do etapu, w którym jego hipotezy staną się podległe empirycznej weryfikacji. Obecny status empirycznych weryfikacji hipotez można scharakteryzować jako obiecujący, ale pozostający daleko poza możliwościami kosmologii wysokiej precyzji (high precision cosmology). Chociaż ostatnia praca napisana z moim magistrantem K. Mielczarkiem wskazuje na takie możliwości [5]. Istnieją jednak tutaj pewne bariery technologiczne.

Wszystkie programy badawcze Lakatos dzieli na postępowe i degenerujące się, przy czym bardzo ważne jest jego rozróżnienie na programy teoretyczne, empiryczne i heurystycznie postępowe. Z tego też powodu dopuszczalna jest sytuacja kiedy równocześnie będą rozwijane konkurencyjne, niezgodne ze sobą programy badawcze. W badanym przypadku mamy właśnie do czynienia z taką sytuacją gdzie obok programu badawczego

kwantowej teorii grawitacji istnieje program badawczy oferowany przez teorię superstrun. Przyjmując zasadę pluralizmu teoretycznego należy zauważyć, że obok siebie mogą koegzystować konkurencyjne, koncepcyjnie odmienne programy badawcze. Należy – i to się de facto we współczesnej fizyce dzieje – poczekać aż niektóre z tych programów badawczych zaczną się degenerować, lecz nie należy ich przedwcześnie zarzucać. Główną przyczyną ewentualnej degeneracji jakiej należy się spodziewać mogą być braki, czy trudności samej teorii a także brak pomysłów dla ich rozwiązania.

Podkreśla się, że istnieją zasadniczo dwa sposoby oceny walorów, czy też wartości programu badawczego [4, s. 115]. Po pierwsze program powinien być spójny tak, aby zapewniać możliwości wypracowania określonych projektów badań przyszłych. Po drugie, program powinien od czasu do czasu prowadzić do odkryć nowych zjawisk. Lakatos, jako przykład programu badawczego spełniającego pierwszy warunek i łamiący drugi, wskazuje marksizm i psychoanalizę Freuda, natomiast socjologię jako przykład teorii dającej przewidywania nowych zjawisk lecz bez odpowiedniej spójności programu badawczego. Pokażemy, że program kwantowej grawitacji posiada podobny status jak pierwsza z wymienionych teorii. Należy jednak pamiętać, że nie mamy tutaj do czynienia ze zdegenerowanym empirycznie programem badawczym (jak teoria Ptolomeusza w czasach Newtona), ponieważ efekty kwantowej grawitacji są potencjalnie weryfikowalne, ale jak do tej pory poza zasięgiem możliwości technologicznych kosmologii obserwacyjnej (high precision cosmology).

Jeśli porównujemy hipotezy w ramach konkretnego programu badawczego, to o ile nie jest trudno wybrać hipotezę lepszą, to już z porównaniem wartości dwóch odmiennych programów badawczych nie musi być już tak prosto. Wyobraźmy sobie bowiem, że w pewnym, uznanym za bezwartościowy, programie badawczym dokonana została jakaś korekta w pasie ochronnym i po pewnym czasie dokonał się znaczny postęp technologiczny w dziedzinie samej techniki sprawdzania i w ten sposób program osiągnął spektakularny sukces. Mając na uwadze podobną sytuację nigdy nie możemy uznać programu za zdegenerowany. Taka właśnie sytuacja może mieć miejsce w przypadku teorii superstrun, dlatego uwaga Lakatosa, że względną wartość dwóch programów można oszacować dopiero *post factum* z perspektywy historycznej wydaje się jak najbardziej trafna.

O ile nie trudno się nie zgodzić, że programy degenerujące się winny ustępować miejsca postępowym, o tyle trudniej jest rozstrzygnąć jak długo należy czekać, aby stwierdzić, że program uległ degeneracji i należy go zarzucić. Rzecz jest bardzo delikatna, jeśli poszukać analogii w historii astronomii. Przypomnijmy sobie jak potrzeba było kilkuset

lat, aby stwierdzić, że Kopernik ma rację jeśli idzie o paralaksę gwiazd stałych. Podobnych przykładów Lakatos podaje więcej. Dlatego nigdy zdecydowanie nie powie on o programie badawczym, że jest lepszy. Powie jedynie, że jest konkurencyjny. Ponieważ Lakatos nigdy nie przedstawił stanowczego kryterium odrzucania programów badawczych, Feyerabend słusznie wyrazi się, że metodologia Lakatosa jest „werbalnym ornamentem”, pamiątką z czasów gdy nauka była przedsięwzięciem opartym na prostych racjonalnych regułach [6, s.215]. Za ostateczny test sprawdzalności metodologii Lakatos uznawał dane z historii fizyki [7]. Lakatos rozważa metodologię naukową programów badawczych z dwóch punktów. Po pierwsze możemy badać problemy metodologiczne, które są w ramach konkretnego programu badawczego. Po drugie może nas interesować dany program badawczy w relacji do innych konkurencyjnych. Pierwszy typ działania polega na ustawicznym rozszerzaniu i wprowadzaniu korekt do pasa ochronnego. Lakatos podkreśla, że uzupełnienia w pasie ochronnym muszą być niezależnie sprawdzalne. Wymóg ten jest bardzo trudny do spełnienia w przypadku analizowanego programu. Tym niemniej wysiłki badawcze grup naukowych zmierzają do takiego rozwijania tych badań w dziedzinie pasa ochronnego, które w przyszłości mogą zaowocować nowymi odkryciami. Taki punkt widzenia jest charakterystyczny dla pętlowej teorii grawitacji i kosmologii pętlowej gdzie mówi się o potencjalnej możliwości testowania teorii i niemożności realizacji tego projektu z powodów obecnych możliwości high precision cosmology.

Metodologia Lakatosa wyklucza posunięcia naukowe w pasie ochronnym, które mają charakter stawiania hipotez *ad hoc*, które nie można poddać niezależnej weryfikacji [4 s. 116]. Lakatos podaje jako przykład sposób tłumaczenia nieregularnego ruchu Urana poprzez postawienie hipotezy, że przyczyną tego zjawiska jest pozanewtonowski charakter oddziaływań grawitacyjnych, czyli de facto zakwestionowanie samego rdzenia programu. Oczywiście, że można to zrobić, czego współczesnym przykładem są próby wyjaśnienia problemu płaskich krzywych rotacji galaktyk eliptycznych poprzez hipotezę *ad hoc*, zwaną MOND (modified newtonian dynamics). Nieumiejętność wykrycia źródła płaskich krzywych rotacji Lakatos nazywałby, jak sądzę, **sytuacją metodologicznego chaosu**. Autor całkowicie podziela taki punkt widzenia, który współcześnie może mieć na imię: problem ciemnej materii i ciemnej energii. Zwróćmy uwagę na to, że koncepcja Lakatosa, dzięki nienaruszalności jej rdzenia jest wolna od podobnej sytuacji. Postęp w programie dokonuje się zdaniem Lakatosa dzięki heurystyce pozytywnej w obrębie pasa ochronnego. Możemy o nim mówić, gdy pewne z hipotez prowadzą do prawidłowych przewidywań. Te z hipotez, które nie wytrzymują próby testów są odrzucane. Niektóre decyzje o ich odrzuceniu mogą

być odroczone. Lakatos zauważa, że w ramach programu badawczego relacja pomiędzy obserwacją a hipotezą sprawdzalną nie nastręcza problemów [4 s. 117] ponieważ, tak rdzeń jak i pozytywna heurystyka określają względnie stabilny język obserwacyjny. Początkowo praca w ramach programu badawczego odbywa się bez zwracania uwagi na falsyfikacje przez dane obserwacyjne. Znajduje to w pełni potwierdzenie w przypadku programu kosmologii kwantowej. Programowi „*in advance*” dajemy szansę zaistnienia, nie krępując jego swobody obserwacjami. W przypadku pętlowej teorii grawitacji mówi się wręcz o zaciemnianiu „horyzontu teoretycznego” poprzez nakładanie więzów obserwacyjnych. W dyskusji z teoretykami osobiście zetknąłem się z takim punktem widzenia. W tym względzie ważną rolę odgrywa pas ochronny. Od programu wymaga się zdecydowanie, aby odniósł przynajmniej chwilowy sukces dając nowe przewidywania, np. taki jak potwierdzenie Eddingtona ugięcia promieni świetlnych w otoczeniu Słońca. Lakatos potwierdza, że fundamentalne znaczenie posiadają raczej bardziej potwierdzenia niż falsyfikacje.

W kontekście badania rozwoju programu badawczego kosmologii kwantowej, kwantowej teorii grawitacji i jego rekonstrukcji wydaje się zasadne dokonanie przez analogię podziału sukcesów na:

1. Sukces teoretyczny – nowy program umożliwia rozwiązanie pewnych dostrzeganych wcześniej trudności innego programu.
2. Sukces empiryczny – nowe przewidywanie teorii, analogiczne do sukcesu Galla, który po raz pierwszy zaobserwował Neptuna, podczas gdy Cavendish odkrył działanie sił grawitacyjnych w warunkach laboratoryjnych.

W przypadku programu kwantowej grawitacji mamy niewątpliwie do czynienia z sukcesem pierwszego typu i oczekujemy sukcesu typu drugiego. W środowisku naukowym daje się wyczuwać nawet pewne zniecierpliwienie brakiem spektakularnych sukcesów pewnych teorii należących do pasa ochronnego. Mam tu na myśli tzw. pętlową teorię grawitacji rozwijaną przez Asthekara, Lewandowskiego i Bojowalda. Musimy jednak pamiętać, że astronomiczna teoria Ptolemeusza nie zdołała przez całe wieki średnie przewidzieć nowych zjawisk. Myślę, że jest za wcześnie, aby poszukiwać analogii teorii Ptolemeusza do kwantowej teorii grawitacji, której należy dać szansę realizacji określonego projektu badań przyszłych. Jeśli przy tym projekt ten będzie charakteryzował się spójnością, to już będzie jego sukces, który w przyszłości może zaowocować odkryciem nowych zjawisk. W przypadku wspomnianej teorii mamy już sytuację, w której ma miejsce zwracanie uwagi na sprawdziany czy testy obserwacyjne, w projekcie badań, w których sam autor pracy uczestniczy.

W koncepcji programów badawczych nie odnajdujemy wyraźnego kryterium, które dałoby nam możliwość stwierdzenia, że gdy porównujemy dwa konkurencyjne programy badawcze, to ten właśnie jest lepszy. Jest to niewątpliwie wada tej koncepcji, co było podstawą dla znanego stwierdzenia Feyerabenda, iż jego metodologia jest „werbalnym ornamentem”, reliktem po czasach kiedy nauka była względnie prostym przedsięwzięciem. Lakatos twierdził, że takie porównanie jest możliwe *post factum*, z perspektywy historii nauki i jest to jedynie możliwy sposób porównywania programów badawczych. W przypadku programu badawczego takie porównywanie jest jeszcze niemożliwe ze względu na krótką historię. W przyszłości będzie możliwe ich porównywanie, gdy je ocenimy z dostatecznej perspektywy jako programy dojrzałe.

Historia fizyki dostarcza mnóstwa przykładów, które mogą być świadectwem niezwyklej złożoności rozwoju fizyki. Z jej historii możemy się nauczyć, że brak jest trwałych i powszechnie akceptowalnych reguł, którymi się kierują uczeni w swoich wyborach [8]. Dlatego uzasadniona wydaje się krytyka Feyerabenda koncepcji programów badawczych. W koncepcji tej nie odnajdujemy standardów, które by wsparły uczonego w ocenie sytuacji historycznej [9]. Jeśli potraktujemy metodologię jako naukę, która wypracowuje standardy i reguły, którymi później w praktyce badawczej kierują się uczeni, to biorąc pod uwagę złożoność samej nauki, naiwnym byłoby twierdzić, że istnieje przewidywalność przyszłych wyników naukowych. Przykładowo, jeśli uznamy pętlową teorię grawitacji, a odrzucimy koncepcję Ambjorna, Loll i Jurkiewicza kauzalnych triangulacji dynamicznych, to może zostać zrealizowany program badawczy kwantowej teorii grawitacji; jest to scenariusz w zasadzie dopuszczalny. To, czego jedynie możemy się nauczyć śledząc różne programy badawcze *in statu nascendi*, to, że brak jest reguł, które by uczonemu powiedziały co ma robić. Są jednak pewne standardy, które wspierają uczonego w jego decyzjach. W następnych rozdziałach będziemy się starać ilustrować taki stan rzeczy na przykładzie ewolucji programu badawczego.

Jest również inna wartość przeprowadzanych analiz. Korzystając z obserwacji żywej nauki na etapie redakcji ich programów badawczych możemy wprowadzać korekty do samych koncepcji z filozofii nauki. Jest to w duchu Lakatosa, który przywiązywał wagę do historii fizyki. Tego typu „case study” mogą jedynie posłużyć wzbogaceniu samych koncepcji rozwoju nauki, tak aby jak najlepiej oddawały jej rozwój i złożoność, a to wydaje się być głównym celem filozofii nauki.

2. Twardy rdzeń programu kwantowej grawitacji i kosmologii kwantowej – próba rekonstrukcji

Zagadnienie rekonstrukcji twardego rdzenia kwantowej teorii grawitacji jest zagadnieniem złożonym i mamy pełną świadomość ryzyka takiego przedsięwzięcia. Chodzi bowiem o sformułowanie założeń programu, które nie będą modyfikowane i pozostaną odporne na falsyfikację. Ponieważ rdzeń programu ma definiować sam program musi być zbiorem bardzo ogólnych hipotez teoretycznych, które będą stanowiły jego bazę. Ze swej natury twardy rdzeń jest nefalsyfikowalny. Zasady te są akceptowalne przez jego zwolenników, dlatego formułujemy zasady składające się na twardy rdzeń każdego podejścia do kwantowej grawitacji, tworzące prerdzeń, rdzeń i podrzeń wiodącego nurtu.

W procesie rekonstrukcji rdzenia proponujemy następującą metodologię. Rozważmy trzy reprezentatywne drogi wiodącego nurtu kwantowej grawitacji w kolejności jakiej one historycznie powstawały.

1. Koncepcja Hawkinga-Hartle’a funkcji falowej dla Wszechświata.
2. Koncepcja kauzalnych triangulacji sformułowana przez Ambjórna, Lool i Jurkiewicza, oraz
3. Koncepcja pętlowej teorii grawitacji.

Przez rdzeń programu będziemy rozumieć zbiór tych zasad pierwszych, które są wspólne dla wymienionych trzech reprezentatywnych kierunków. Każdy z tych projektów 1 – 3 może być traktowany jako alternatywny projekt badawczy, którego celem jest konstrukcja adekwatnej kwantowej teorii grawitacji oraz modelu kosmologicznego (kosmologii kwantowej i kwantowej grawitacji), będącego jej naturalną chociaż bardzo spekulatywną aplikacją. Można powiedzieć, że rdzeń programu jest „inwariantną” własnością samych projektów badawczych, które zaliczamy do pasa ochronnego programu badawczego.

Przejdźmy teraz do krótkiego, z konieczności omówienia poszczególnych dróg do kwantowej grawitacji. W takim a nie innym wyborze kierowaliśmy się zasadą spójności tych podejść, które w pewnym sensie wyrastają ze wspólnego podłoża. Lee Smolin w swojej książce „Trzy drogi do kwantowej grawitacji”, podobnie jak my, wymienia teorię grawitacji, koncepcję dynamicznych triangulacji oraz teorię superstrun [10]. Nie jest naszym celem popularyzowanie tej teorii zwłaszcza w kontekście istnienia niedoścignionego ideału, jakim

jest książka popularna jednego z jej twórców Briana Greena [11, 12, 13, 14]. Teoria superstrun jest próbą wyjścia poza ramy teorii zaburzeń, co ma duże znaczenie dla kwantowej teorii pola. Tak zwany model standardowy (unifikujący teorię oddziaływań elektroslabych na bazie modelu Weinberga–Salama oraz chromodynamikę kwantową) wydaje się całkowicie zadowalającym modelem z punktu widzenia danych obserwacyjnych z dziedziny cząstek elementarnych. W ramach modelu standardowego wykorzystywane są nowe idee fizyczne takie jak, spontaniczne złamanie symetrii, czy też efekt Higgsa. Sukcesy modelu standardowego są pokusą w kierunku włączenia do modelu grawitacji, która również podlega opisom przez uważaną za fundamentalną, teorię grawitacji Einsteina. To, czego oczekujemy od takiej fundamentalnej teorii, to zunifikowany opis wszystkich 4 –fundamentalnych oddziaływań, co może mieć znaczenie dla konstrukcji kwantowej teorii grawitacji i teorii pól cechowania, leżących u podstaw teorii pól cechowania. Teoria strun jest stopniowo scaloną konstrukcją *in statu nascendi* ożywianą różnymi interesującymi (również filozoficznie) zasadami, jak np. zasada holograficzna [15]. Podstawową rolę odgrywają tak zwane relacje dualności –podstawowa koncepcja heurystyczna nieperturbacyjnej teorii strun. Podstawowa idea dualności polega na tym, że to samo zjawisko fizyczne może posiadać różny opis we wzajemnie komplementarnych (albo dualnych) językach. Przykładowo możemy uzyskać opis zjawiska jeden osadzony w pięciu wymiarach, drugi w dwóch (przykład Maldaceny).

Zdecydowaliśmy się wyłączyć teorię superstrun z ogólnego schematu, chociaż teoria ta z definicji jest kwantowa, ponieważ jest ona pojęciowo niewspółmierna z pozostałymi teoriami, które posłużą nam do rekonstrukcji rdzenia. Jest jeszcze inny powód, który nie każe nam włączyć teorii superstrun do tego schematu. Na zagadnienie to zwrócił ostatnio uwagę prof. A. Staruszkiewicz w dyskusji na Krakowskiej Szkole Metodologicznej (2007). Otóż teoria superstrun jako pierwsza teoria fizyczna mająca ambicje bycia teorią fundamentalną nie potrafi wyjaśnić podstawowych parametrów modelu standardowego i zamiast tego wspiera się koncepcją wieloświata (i wielu próżni). Jest to, jego zdaniem, odejście od powszechnej praktyki w fizyce kiedy to nowa teoria, zamiast ogłosić swoją klęskę (co zdaniem Staruszkiewicza daje poczucie ulgi z powodu pozbycia się problemu) odwołuje się do spekulatywnej koncepcji wieloświata.

Jednym z zauważonych przez Feyerabenda przykładów niewspółmierności była relacja mechaniki relatywistycznej do mechaniki klasycznej [16]. W przypadku teorii superstrun teoria grawitacji Einsteina nie jest już w niczym wyróżniona, a język opisu zjawisk jest niekomplementarny. Wydaje się, że w procesie rekonstrukcji, generalnie powinny być brane różne ale współmierne projekty badawcze, chociaż ich motywacje mogą być tożsame

[17]. Oprócz teorii superstrun dla wymienionych wyżej powodów nie włączyłem tzw. teorii zbiorów kauzalnych, traktowanych również jako pewne ważne i rozwijane podejście do kwantowej teorii grawitacji [18]. Pomiąłem również ważny nurt tzw. niekomutatywnej geometrii [19]. Lista pominiętych podejść do kwantowania grawitacji jest jeszcze dłuższa, lecz w próbie rekonstrukcji rdzenia kwantowej grawitacji należało wstępnie wyodrębnić spośród możliwych i różnorodnych podejść te, które wyrastają niejako z jednego pnia – są współmierne [20]. Wszystkie te różnorodne koncepcje należałoby jednak umieścić w pasie ochronnym rdzenia, ponieważ dają one wsparcie rozwijaniu głównych idei programu. Jako przykład takiej teorii, można podać koncepcję geometrii statystycznej. Oczywiście, że można by pominięte teorie włączyć do rekonstrukcji lecz wówczas otrzymane wnioski byłyby trywialne.

Ostatnio bardzo interesującą uwagę poczynił Fotoni Markopoulou stając przed klasyfikacją różnych podejść do kwantowej grawitacji [21]. Markopoulou powiada (z czym się zgadzam), że można dokonać ich klasyfikacji biorąc pod uwagę dwa kryteria:

1. status czasoprzestrzennej geometrii, tzn. biorąc pod uwagę czy jest ona fundamentalna czy też emergentna - powstaje z innej struktury. Odpowiednio do tego stawia to pytanie o status Ogólnej Teorii Względności: czy OTW jest teorią fundamentalną czy emergentną)
2. dynamiczny czy statyczny charakter czasoprzestrzeni, tzn. czy pojęcie czasoprzestrzeni jest zadane, czy też jest ona tworem dynamicznym.

Kryterium (2) jest w istocie kryterium rozstrzygającym czy pojęcie czasoprzestrzeni jest absolutne, czy też posiada charakter relacyjny. Jeśli teraz skrzyżujemy kryteria (1) i (2), otrzymamy cztery typy podejść do kwantowej grawitacji. Przykładowo, jeżeli przyglądnimy się teorii superstrun, to w tej teorii OTW jest emergentna, natomiast czasoprzestrzeń jest ustalona od samego początku (absolutna) i nie podlega dynamicznej ewolucji. Drugi typ podejść to te kategorie teorii, do których można by zaliczyć: pętlową teorię grawitacji, teorię spinowej piany kwantowej, teorię dynamicznych triangulacji czy teorię zbiorów kauzalnych [22]. W tym podejściu o ile geometria oraz grawitacja są ciągle traktowane za fundamentalne, lecz na poziomie kwantowym, nie klasycznym. Te podejścia implementują niezależność opisu od przestrzeni tła (background independent formulation). W podejściach tych amplituda prawdopodobieństw przejścia między stanami (propagator) jest określony przez superpozycję

geometrii czasoprzestrzeni, a stąd geometria nie jest zadana, tzn. nie posiada charakteru absolutnego. W rekonstrukcji rdzenia wymienione właśnie w tym punkcie podejścia znajdują się w pasie ochronnym programu kwantowej grawitacji. Należy jednak do kategorii tych teorii dorzucić klasyczne podejście, takie jak kwantowanie kanoniczne, czy też podejście Hawkinga-Hartle'a, których status czasoprzestrzeni, jak i relacyjność pojęcia czasu i przestrzeni jest zakładane.

Do trzeciej grupy należą podejścia inspirowane przez fizykę fazy skondensowanej [23]. W tym podejściu pojęcie czasoprzestrzeni jest sztywne, jak dla układów z fazą skondensowaną.

Czwarty typ podejścia można by nazwać podejściem pregeometrycznym i niezależnym od tła (pre-geometric background independent approach). Punktem wyjścia tego podejścia jest teoria mikroskopowa układów kwantowych, w której nie odnajdujemy odniesień do czasoprzestrzennej geometrii. W tym podejściu tak grawitacja, jak i geometria są emergentne. Geometria jest tutaj definiowana wewnętrznie przy pomocy tych podukładów i ich oddziaływań. Wobec tego geometria jest dynamiczna od samego urodzenia [24, 25, 26]. To podejście pozostaje w ścisłym związku z podejściem drugim, ponieważ jego punktem wyjścia jest tradycyjna niezależność pojęć od przestrzeni tła oraz, założenie „kwantowej geometrodynamiki” – przestrzeni grawitacyjnych i geometrycznych stopni swobody. F. Makropoulou zauważa, że podejście to posiada problem odzyskania (emergencji) OTW, jako granicy niskoenergetycznej [21]. Autor słusznie zauważa, że zarzut ten nie dotyczy jedynie przypadku teorii kauzalnych dynamicznych triangulacji [27]. Markopoulou uważa, że OTW powinna być traktowana jako czysta efektywna teoria, która powinna być wyprowadzona z bardziej fundamentalnej teorii, która nie będzie posiadać jedynie geometrycznych stopni swobody, a stąd niezależności od przestrzeni tła. Autor konkluduje [21], że geometrogenesa, jako podejście do kwantowej grawitacji, każe przemyśleć na nowo rolę mikroskopowych kwantowo-geometrycznych stopni swobody, które są tradycyjnie obecne w teoriach „background independent” niezależnych od przestrzeni tła.

Widzimy z tego krótkiego przeglądu możliwych podejść do kwantowej teorii grawitacji wielość możliwych podejść, aż do rezygnacji z opisu geometrycznego i rezygnacji z pojęcia czasoprzestrzeni.

Moim zdaniem, obecnie na gruncie podejść do kwantowej teorii grawitacji toczy się ważny filozoficzny dyskurs, dotyczący statusu grawitacji, pojęcia czasoprzestrzeni i tego, co jest fundamentalne, opis kwantowy czy klasyczny. Czy kwantowe stopnie swobody powinny być geometryczne? Jaka powinna być rola pojęcia czasoprzestrzeni w teorii kwantowej? Taki

punkt widzenia nie jest zresztą moim oryginalnym poglądem, lecz był niejednokrotnie artykułowany przez innych [28].

Czasoprzestrzeń OTW jest parą (M, g) , gdzie M jest 4-wymiarową rozmaitością różniczkowalną parazwartą, a g metryką określoną na niej, posiadającą strukturę Lorentza. Jeśli potraktować gładką rozmaitość M z metryką g jako niskoenergetyczne przybliżenie teorii kwantowej to pojawia się fundamentalny problem opisu emergencji Einsteinowskich równań pola, które pojawia się jako granica. Zwykle postępujemy w ten sposób, że parę (M, g) zanurzamy w ciągu pewnych dyskretnych struktur $\Omega(l)$, l jest długością Plancka (np. triangulacji M z krawędziami o długościach indukowanych przez g_{ab} rzędu l). Wówczas pokazujemy, że pewna wielkość powiedzmy Q , która rządzi dynamiką (jak np. działanie w podejściu kowariantnym) dąży do ciągłej wersji, liczonej dla (M, g_{ab}) , tj.

$$Q(\Omega(l)) = Q(M(g_{ab})) + O(l^2)$$

To podejście do emergencji OTW jest w istocie próbą rekonstrukcji ciągłego czasoprzestrzennego continuum z pewnej przestrzeni dyskretniej. Zawsze postępujemy tak, że dyskretna struktura Ω jest zanurzalna w gładkiej czasoprzestrzennej rozmaitości [29]. Należy jednak zauważyć, że jest to najprostsza możliwość rekonstrukcji, ponieważ dyskretna struktura nie muszą być zanurzalne w gładkiej geometrii [30].

Mam nadzieję, że udało mi się, chociaż częściowo zilustrować różnorodność podejść do kwantowej grawitacji. Oczywiście można by podać pewien minimalny zbiór tez składających się na program badawczy, który opierałby się on na kilku zasadach. Wyobrażam sobie, że zasady prerdzienia winny być bardzo ogólne i mogą posiadać charakter założeń filozoficznych. Wielu fizyków, a wśród nich R. Feynman, uważa, że założenie, że materia składa się z atomów za najważniejsze założenie we współczesnej fizyce. Chciałbym, aby w skład założeń prerdzienia wchodziły zasady takie jak np. w fizyce przyrody założenie atomistycznego modelu świata [31]. Zasady te będą składać się na to co nazwiemy prerdziem–punktem wyjścia każdego podejścia. Następnie do zasad prerdzienia dorzucimy nowe zasady tak, aby zrekonstruować nowy program badawczy do kwantowej grawitacji. Moje propozycje zasad fundamentalnych są następujące:

ZASADA 1 FUNDAMENTALNOŚCI TEORII KWANTOWEJ: FUNDAMENTALNE TEORIE FIZYCZNE POWINNY BYĆ Z NATURY TEORIAMİ KWANTOWYMI.

Z zasady 1 wyprowadzamy wniosek, że OTW jest tylko teorią efektywną, która powinna być odzyskana z teorii kwantowej. Zasada 1 nic nie mówi o pojęciu

czasoprzestrzeni. Jedynie jest dyrektywą, że powinniśmy zmierzać do kwantowego opisu zjawisk. Zasada ta nie daje drogowskazu, w jaki sposób taką teorię znaleźć. Zasada 1 prowadzi do wniosku, że to teoria grawitacji powinna być emergentna. Analogicznie zasadę można by sformułować dla programu badawczego kosmologii kwantowej opartego na zasadzie:

ZASADA 1' FUNDAMENTALNOŚCI KWANTOWEGO OPISU WSZECHŚWIATA: FUNDAMENTALNE WŁASNOŚCI WSZECHŚWIATA SĄ WŁASNOŚCIAMI KWANTOWYMI.

Zgodnie z tą zasadą kosmologia kwantowa jest naturalnym obszarem aplikacji kwantowej teorii ponieważ Wszechświat przeżywał w przeszłości stan osobliwy, w którym efekty kwantowe były ważne. O ile w klasycznej kosmologii stan osobliwy jest stanem nie rozciągniętym w czasie, o tyle pętlowa teoria grawitacji rozciąga ten stan przez tzw. *bounce* (odbicie). Teoria kwantowa opisuje Wszechświat przeżywający stan *bounce*, w którym prawa fizyki są spełnione. Zauważmy, że program Milne'a konstrukcji kosmologii z zasad pierwszych i wyprowadzenie stąd kwantowej teorii grawitacji, byłby aktualny. Tutaj owocna byłaby wspomniana teoria zbiorów kauzalnych.

Należy podkreślić, że we współczesnych próbach konstrukcji kosmologii kwantowej nie nawiązuje się do projektu Milne'a kosmologii z pierwszych zasad dotyczących pomiaru czasu i przestrzeni, a kosmologia jest traktowana jedynie jako dziedzina fenomenologiczna – obszar aplikacji teorii kwantowej grawitacji do szczególnego obiektu, jakim jest Wszechświat. Często uważa się, że teoria kwantowa powinna się zmierzyć z klasycznymi trudnościami kosmologii klasycznej i pokazać, że stwarza możliwości ich rozwiązania. Są to niejako testy teoretyczne dla różnych podejść.

Do zasad (1) i (1') dodałbym kolejne zasady:

ZASADA 2 FUNDAMENTALIZMU PRAW FIZYKI WYRAŻONYCH W JĘZYKU RÓWNAŃ RÓŻNICZKOWYCH: FUNDAMENTALNE PRAWA FIZYKI SĄ FORMUŁOWANE W JĘZYKU RÓWNAŃ RÓŻNICZKOWYCH (CIĄGŁYCH LUB DYSKRETYCH).

ZASADA 2': WSZECHŚWIAT JEST OPISYWANY PRZEZ MODEL SFORMUŁOWANY W JĘZYKU RÓWNAŃ RÓŻNICZKOWYCH Z CZASEM CIĄGŁYM LUB DYSKRETYM.

Pojęcie czasoprzestrzennej rozmaitości gładkiej jest opisywane w ramach standardowej geometrii różniczkowej i gdy zejdziemy poniżej rozmiarów Plancka, wówczas czasoprzestrzeń staje się dyskretna, lecz nie bardzo wiemy, czym zastąpić geometrię różniczkową ciągłego continuum. Dobitnie to wyraża Isham gdy pisze: „Perhaps the entire paraphernalia of differential geometry is only appropriate at scales grater than the Planck length. But if so with what should it be replaced” [32]. Isham twierdzi, że należy ciągle continuum czasoprzestrzenne zastąpić dyskretną metryką, a równania pola, skończonymi równaniami różniczkowymi. Inny wybitny teoretyk T. D. Lee twierdzi, że równania różniczkowe są bardziej fundamentalne, a ich aproksymacje nie oddają wszystkiego [33]. Dużą rolę w opisie praw może odegrać ich sformułowanie w języku matematyki dyskretnej, która jest ogromnie interesującym działem matematyki.

Alternatywną do zasad (2) i (2') jest przykładowo formułowanie praw fizyki (czy Wszechświata) w języku kombinatoryki, czy też statystyki (np. macierzy losowych). Będąc na wykładzie profesora Dijkgrafta, na konferencji Loops 2005, zapamiętałem następującą historyjkę. Prelegent referował podejście do kwantowej grawitacji z punktu widzenia teorii superstrun. Prowokacyjnie na pierwszej folii zamieścił śmietnik, w którym umieścił wiele z wymienionych podejść do kwantowania grawitacji włącznie z pętlową teorią grawitacji. Dla kontrastu obok śmietnika umieścił rysunek z ilustracją przestrzeni Callabi -Yau, którą opisał w terminach kombinatorycznych i nazwał – beauty. Później w dyskusji po wykładzie prof. Rovelli nie zgodził się z jego punktem widzenia twierdząc, że on posiada inną metodologię. Cóż, chciał on *de facto* wyrazić, że jego teoria (pętlowa grawitacja) formułuje prawa w języku równań różniczkowych, a nie w terminach kombinatorycznych. Zauważmy, że ich spór na konferencji na wskroś fizycznej posiadał naturę filozoficzną – dotyczył języka, w jakim mają być formułowane prawa fizyki kwantowej grawitacji. Jest to dość charakterystyczne we współczesnej fizyce, gdzie fizyka i filozofia spotykają się ze sobą w skali Plancka. Uчени pracujący w teorii superstrun nie traktują teorii Einsteina z jej geometrycznym opisem grawitacji jako dogmat, stąd łatwiej im przyjąć jako punkt wyjścia zasadę będącą zaprzeczeniem zasady 2. Oczywiście za prekursora takiego podejścia można by uważać Milne'a. Zasadę 2 trafnie byłoby też nazwać zasadą kwantowej natury praw przyrody i odpowiednio kwantowej natury Wszechświata.

Zauważmy, że jeśli prawa fizyki są formułowane w języku równań różniczkowych, wyłania się podstawowa trudność z ich aplikacją do Wszechświata jako całości –problem warunków początkowych. O ile badać efekty kwantowej grawitacji w pobliżu czarnych dziur

warunki początkowe mogłyby być wzięte z astrofizyki, o tyle dla Wszechświata nie istnieje jakieś zewnątrz i warunki początkowe dla Wszechświata posiadają status praw fizyki.

Inną sprawą jest zagadnienie wyboru modelu dla realnego Wszechświata. Ponieważ prawa fundamentalne są określone w języku równań różniczkowych, ich rozwiązania będą zależeć od wyboru tych warunków początkowych i warunków brzegowych. W klasycznej kosmologii problem ten jest rozwiązywany poprzez testowanie modeli kosmologicznych poprzez obserwacje astronomiczne czy też testy astrofizyczne. Jak to zrobić w przypadku efektów kwantowej grawitacji, gdy są one w obecnej epoce małe jest problemem otwartym.

Pokazałem ostatnio, że efekty kwantowej grawitacji są potencjalnie testowane chociaż są one bardzo słabe, daleko poza zasięgiem obecnych i przyszłych obserwacji [34]. Moim zdaniem idea testowania stosowana dla selekcji modelu realnego Wszechświata nie jest użyteczna i musimy wyprowadzić nową ideę - np. Bayesowskie modele selekcji - i zarzucić testowanie z definicji słabych efektów kwantowych w obecnej klasycznej epoce. Gdy fundamentalna teoria grawitacji jest kwantowa, wówczas nowego wymiaru nabierze wyprowadzenie i testowanie OTW jako niskoenerygetycznej granicy teorii kwantowej.

Zasady 1, (1') i 2 (2') są zasadami, które można by traktować jako zasady każdego twardego rdzenia programu badawczego kwantowej grawitacji (kwantowej kosmologii). Musimy mieć jednak świadomość, że są to zasady oparte na podzielanym przez większość fizyków poglądzie, że teoria grawitacji jest jedynie teorią efektywną. Podawany jest często przykład, że spin cząstki kwantowej (więc efekt kwantowy) nie posiada swojego odpowiednika w świecie klasycznym. Innymi słowy wiele efektów fizycznych nie posiada swoich odpowiedników klasycznych przy pewnym przejściu granicznym, co oznacza, że teoria kwantowa jest bardzo fundamentalną teorią. Interesujące uwagi na temat statusu Ogólnej teorii Względności poczynił ostatnio T. Padmanabhan [35, 36]. Autor argumentuje, że zrozumienie problemu ciemnej energii (stałej kosmologicznej) pozostaje w ścisłym związku z naszym zrozumieniem samej natury grawitacji. Autor uważa grawitację za zjawisko emergentne. Nieznane, mikroskopowe stopnie swobody czasoprzestrzennej struktury są ważne wtedy, gdy próbujemy ją w skali Plancka. Kiedy badamy ciało stałe, wtedy wyróżniamy trzy różne poziomy opisu: makroskopowy (teoria sprężystości), opis mikroskopowy w terminach mechaniki statystycznej atomów i ich oddziaływań oraz opis termodynamiczny. Wszystkie te teorie żyją swoim niezależnym życiem. Status grawitacji jest podobny, zdaniem Padmanabhana do statusu teorii elastyczności, która daje pewien opis, ale nie wyklucza to istnienia mikroskopowych stopni swobody (zjawiska termiczne nie posiadają mikrostruktury).

W przypadku kosmologii wyobraźmy sobie, że efekty kwantowe były związane z dyskretną strukturą czasoprzestrzeni (przestrzeni) a obecny jej model gładki jest wynikiem emergencji a nie odwrotnie.

Chrystian Wüthrich bada motywacje za kwantowaniem grawitacji i zauważa, że jakkolwiek istnieje wielość sposobów kwantowania grawitacji to podejścia te łączy fakt, że teorię grawitacji postrzegają one jako teorię efektywną [37].

W przypadku kosmologii standardowej zmierzającej do opisu wielkoskalowej struktury i ewolucji wszechświata zakłada się, że oddziaływania grawitacyjne są fundamentalne (lecz nie wyłącznie, ponieważ epoka nukleosyntezy i procesy w niej zachodzące nie będą się rządzić prawami grawitacji tak jak i faza inflacji). Oddziaływania grawitacyjne są powszechne w tym sensie, że dowolne ciała obdarzone masą im podlegają. Propozycja kwantowej grawitacji jest ekstrapolacją praw fizyki kwantowej, zgadzającej się w naszych laboratoriach do obszarów silnych pól grawitacyjnych (np. czarne dziury) czy też cały Wszechświat. Oczywiście, że dalej oddziaływania grawitacyjne będą kształtować strukturę Wszechświata w dużej skali, lecz ich natura będzie kwantowa.

Rodzi się pytanie: czy zakładając, że potrzebujemy kwantowej grawitacji (co jest często artykułowane przez fizyków i należy już niejako do folkloru fizyki) pole grawitacyjne musi z konieczności w takiej teorii mieć charakter kwantowy? Pytanie takie było stawiane wcześniej przez Callender i Huggett [38, 39, 40]. Odpowiedź przywołanych autorów jest negatywna, tzn. i w tym kontekście przywoływany jest przykład, w którym do równań Einsteina wchodzi efekty kwantowe pól materii i zamiast równań $G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$ mamy $T_{\mu\nu} = 8\pi G_{\mu\nu} \langle \Psi | T_{\mu\nu} | \Psi \rangle$, gdzie $\langle \dots \rangle$ jest wartością oczekiwaną (średnią) dla kwantowego stanu pola Ψ . Wówczas równanie Einsteina jako źródło posiadają kwantową materię lecz podejście do czasoprzestrzeni jest klasyczne. Oczywiście efekty te będą poprzez mechanizm reakcji odwrotnej (back reaction) zmieniać geometrię czasoprzestrzeni.

Innym argumentem przeciw kwantowaniu grawitacji jest przykład Sakharowa indukowanej teorii grawitacji [41]. W koncepcji Sakharova koncepcja grawitacji nie jest traktowana jako teoria fundamentalna pola, lecz jako teoria indukowana emergentna z kwantowej teorii pola, podobnie jak hydrodynamika jest emergentna z fizyki molekularnej. W koncepcji tej zakłada się absolutna rozmaitość tła, na której rozgrywają się procesy kwantowe opisywane przez kwantową teorię pola. Teoria pola rozgrywa się na sztywnym, czasoprzestrzennym tle i wówczas działanie efektywne na poziomie jednopętlowym zawiera automatycznie człon proporcjonalny do stałej kosmologicznej i działanie Einsteina–Hilberta.

Indukowana teoria grawitacji Sakharova *explicite* pokazuje, przynajmniej teoretycznie, możliwą sytuację, że quasi-klasyczna, efektywna teoria grawitacji nie wymaga kwantowania grawitacji. Również podaje się pewne argumenty przeciw kwantowej naturze Wszechświata wskazując, że długość Plancka nie jest wielkością inwariantną, a stąd argument, że w tej skali powinna obowiązywać teoria kwantowa nie jest oczywisty. Podnoszony jest również inny argument, że Wszechświat jako całość nie jest układem kwantowym ponieważ wszechświat jest dany w jednym egzemplarzu i nie istnieją jego identyczne kopie, a obserwator jest częścią samego układu [42].

Dodałbym do tego jeszcze przykład Feynmana teorii grawitacji, która posiada z urodzenia niegeometryczny charakter. W tej teorii przestrzeń jest absolutna – przestrzeń Minkowskiego, natomiast pole grawitacyjne spełnia równania analogiczne do Einsteinowskich równań pola. W konstrukcji tej teorii grawitacji posługujemy się analogią do elektrodynamiki [43, 44]. Niegeometryczna teoria grawitacji R. Feynmana jest bardzo interesująca z filozoficznego punktu widzenia i sporu między absolutyzmem i relacjonizmem [45].

Podane „zasady minimum” twardego rdzenia każdej teorii grawitacji z jednej strony pozwalają zrekonstruować różnorodność podejść kwantowych, lecz z drugiej jednak nie mogą być traktowane jako podstawa dla budowy przyszłej teorii grawitacji, ponieważ rekonstrukcja posiada zbyt dużo swobody dla możliwych podejść.

Nasza dalsza strategia zmierza w kierunku zawężenia możliwych podejść do wymienionego wcześniej w punkcie 2. Chociaż jest to już wybór w pewnym sensie arbitralny i od samego początku zawężamy się do tzw. wiodących podejść z frontu badań naukowych to potrafimy zrekonstruować pewien fragment tych badań. Należy jednak pamiętać, że rekonstrukcja nie określa dyrektyw dla konstrukcji poprawnej teorii kwantowej grawitacji. Jest to ilustracją poglądu, że filozofia nauki nie podaje precyzyjnych zasad konstrukcji przyszłych teorii, lecz porządkuje pewien materiał badawczy i pozwala dostrzec pewną ukrytą logikę tych odkryć naukowych. Komplementarne podejście do rekonstrukcji może polegać na sformułowaniu tego, co John Stachel uważa za „conditions of possibility” przyszłej kwantowej grawitacji, jeśli wcześniej przyjmujemy pewne założenia dla programu badawczego [46]. Oczywiście, że jest to inny sposób rekonstrukcji, który jest równie interesujący o ile potrafi uchwycić złożoności praktyki badawczej i zrekonstruować chociaż jej fragment.

Przejdźmy teraz do rekonstrukcji samego rdzenia wiodącego podejścia do programu badawczego kwantowej grawitacji:

1. Uznajemy Ogólną Teorię Względności z jej zasadą kowariantności.
2. Zachowujemy pojęcie czasoprzestrzeni określonej z dokładnością do dyfeomorfizmu (jako bytu o naturze relacyjnej). Własności fizyczne spełniają warunek niezmienniczości względem wyboru układu współrzędnych czasoprzestrzeni t ła.
3. Jako przestrzeń stanów układu wybieramy przestrzeń geometrii (3-przestrzennych lub czasoprzestrzennych). Uznajemy, że istnieje dobrze określona wielkość pozwalająca podać amplitudę przejścia pomiędzy możliwymi klasycznymi stanami układu. Grawitacyjne stopnie swobody układu są więc jej geometrycznymi stopniami swobody.

Zasady programu badawczego składającego się na twardy rdzeń tego wiodącego programu badawczego zestawiono poniżej, gdzie podano tylko dodatkowe tezy do wcześniejszych zasad minimum składających się na prerdzeń programu badawczego.

ZASADY RDZENIA PROGRAMU BADAWCZEGO KWANTOWEJ TEORII GRAWITACJI

- pojęcia czasoprzestrzeni i grawitacji są fundamentalne na poziomie kwantowym,
- przestrzeń stanów klasycznych układu (przestrzeń konfiguracyjna) jest przestrzenią metryk przestrzennych bądź czasoprzestrzennych, określonych modulo dyfeomorfizm.
- przejściami pomiędzy stanami układu rządzą prawa mechaniki kwantowej (w sformułowaniu całek po trajektoriach lub standardowo w terminach funkcji falowej).

ANALOGICZNIE MOŻEMY SFORMUŁOWAĆ ZASADY RDZENIA PROGRAMU KOSMOLOGII KWANTOWEJ.

- model kosmologiczny opisuje Wszechświat będący układem kwantowym opartym na oddziaływaniach grawitacyjnych,
- przestrzeń grawitacyjnych stopni układu jest przestrzenią geometrii modelu,
- mechanika kwantowa określa amplitudę prawdopodobieństwa przejścia pomiędzy stanami układu.

Ostatnia z wymienionych zasad może opierać się na odpowiedniku równania Schrödingera, równaniu Wheelera–DeWitta bądź Feynmanowskim podejściu całek po trajektoriach. Podejście to jest opisem teorii kwantowej, opartym na uogólnionej zasadzie działania mechaniki klasycznej. W tej teorii klasyczne pojęcie pojedynczej historii układu zostaje zastąpione przez sumę (całką funkcjonalną) po możliwych historiach wnoszących wkład do

amplitudy przejścia między stanami. Podejście to zostało zaproponowane w 1948 roku przez R. Feynmana a jego podstawy dał Archibald Wheeler w swojej pracy doktorskiej. Podstawowe postulaty tego sformułowania są następujące:

- prawdopodobieństwo dla dowolnego zdarzenia jest określone kwadratem modułu zespolonej amplitudy funkcji falowej,
- amplituda dla przejścia między stanami jest dana przez sumę po wszystkich możliwych historiach, które zawierają to zdarzenie,
- amplituda pewnej historii wnoszącej wkład do całki funkcjonalnej wchodzi z pewną wagą proporcjonalną do eksponenty $e^{iS/\hbar}$, gdzie S jest działaniem klasycznym (całką po czasie z Lagranżjanu).

W pasie ochronnym programów badawczych znajduje się teoria dynamicznych kauzalnych triangulacji o której już wcześniej mówiliśmy, że odtwarza działanie klasycznej grawitacji¹. Teoria ta dostarcza również technik liczenia całki funkcjonalnej rozkładając czasoprzestrzeń na 4-sympleksy (czterowymiarowe analogi zwykłych czworościanów). Kluczym pomysłem zastosowanym w tym podejściu jest sumowanie tylko po takich historiach, które nie łamią warunku kauzalności. Przyjęcie takiego założenia pozwoliło w roku 2004 R. Loll, Ambjornowi i J. Jurkiewiczowi policzyć numerycznie amplitudy prawdopodobieństwa i uzyskać wyniki zgodne z klasycznymi modelami kosmologicznymi. Lee Smolin uważa to podejście za najbardziej obiecujące i należy się z nim zgodzić [47]. Teoria ta daje wyniki numeryczne, które są w pełni akceptowalne. W rachunkach tych wykorzystywane są metody macierzy losowych i symulacji Monte – Carlo w liczeniu prawdopodobieństw wszelkich możliwych konfiguracji sympleksów.

O ile kiedyś tego typu rachunki uważano za przybliżone, a przez to jakoś niekompletne, o tyle dzisiaj można w dowodach matematycznych spotkać dowody wspomagane numerycznie i w pełni akceptowalne. Wydaje się, że potrzebowaliśmy pewnego czasu, aby sobie uświadomić, że wyniki numeryczne są również ściśle jak wyniki analityczne, a czasami są one jedynymi możliwymi, ponieważ taka jest natura samego problemu. Dzisiaj mówimy o matematyce eksperymentalnej jako pełnoprawnym jej dziale, co oznacza, że w

¹ W teorii Ambjorna, Loll i Jurkiewicza startujemy z działania Hawkinga-Hartle’a, ale zdyskretyzowanego. Oczywiście struktura opisywana przez to działanie ewoluuje w czasie, co jest opisywane przez formalizm feynmanowskich całek po trajektoriach. Odtwarzanie działania Hawkinga-Hartle’a oznacza, że dla późnych czasów i dużych rozmiarów struktury, globalne własności sympleksów, gdy je badamy numerycznie, odtwarzają ciągłą konfigurację FRW. Formalnie wówczas metryka jest odtwarzana z działania.

nauce zmieniły się same metody oraz reguły akceptacji twierdzeń i hipotez. To, co wydarzyło się w matematyce przydarzyło się też fizykom.

Wnioski

Wiodący program badawczy kwantowej grawitacji spełnia warunki dojrzewającego programu badawczego. Jego charakterystyczne cechy są następujące.

1. Priorytetem jest przezwycięzenie wewnętrznych trudności, co można by uznać za główną motywację dla jego rozwijania. Jest to etap, w którym program nie posiada jeszcze spektakularnych sukcesów typu odkryć nowych zjawisk, czy potwierdzeń empirycznych, ale już posiada pewne sukcesy polegające na rozwiązaniu pewnych trudności wcześniejszego programu klasycznej teorii grawitacji. Teorie fizyczne posiadają zawsze pewien zakres aplikowalności, tzn. istnieje pewna granica, poza którą teoria nie może być ekstrapolowana. Takie wewnętrzne obcięcie („*cut off*”) posiada klasyczna teoria grawitacji, która jest teorią klasyczną. Jej ograniczenia uświadamiamy sobie w sposób dramatyczny, gdy usiłujemy ją ekstrapolować do najwcześniejszych etapów ewolucji Wszechświata. Zderzamy się wówczas z problemem osobliwości kosmologicznej. Innymi słowy, teoria odsłania swoje słabości w chwili, gdy jej ekstrapolacja prowadzi do absurdalnych wniosków. Osobliwości początkowe nie mogą być interpretowane na gruncie klasycznej teorii grawitacji jako granice naszego opisu, ponieważ sam opis jest niekompletny. Ograniczając się do opisu klasycznego, gdy opis ten zmodyfikujemy, trudność zostanie rozwiązana, jak pokazuje to pętlowa teoria grawitacji. Osobliwości początkowe są postrzegane nie jako granice naszego poznania lecz jako obcięcia samej teorii. Niekiedy jest taka sytuacja, że teoria sama z siebie obnaża takie obcięcia, zwane *cut off*. Konstruując model Wszechświata w oparciu o klasyczną OTW, robimy na samym początku założenie, że teoria ta opisuje własności Wszechświata począwszy od momentu, gdy grawitacja nie jest już tak „silna” żeby uwzględniać efekty kwantowej teorii grawitacji.

Korzystając z tych obserwacji należy odróżnić od sukcesów teoretycznych sukces empiryczny i zaklasyfikować program badawczy kosmologii kwantowej do programów teoretycznych postępowych z prognozami postępu empirycznego, ale bez jakichś spektakularnych sukcesów obserwacyjnych, czy też predykcji nowych zjawisk. Tutaj moja praca z Mielczarkiem otwiera pewne okno na możliwość testowania kosmologii kwantowej. Okazuje się bowiem, że z epoki Plancka Wszechświat wychodzi do fazy preinflacji i widmo wysokoenergetycznych fotonów mogłoby być zarejestrowane, ale przy osiągnięciu maksymalnej czułości przez LIGO.

2. Należy odróżnić program badawczy kwantowej teorii grawitacji od programu badawczego kosmologii kwantowej. Zbudowanie kwantowej teorii grawitacji nie oznacza automatycznie

rozwiązanie problemu kosmologicznego. Wszechświat jest sam w sobie czymś tak bardzo wyjątkowym, że program konstrukcji modelu kwantowego Wszechświata jest przedsięwzięciem samym w sobie ogromnie złożonym. Źródłem tej złożoności jest chociażby to, że warunki początkowe dla Wszechświata kwantowego nie mogą być wzięte z zewnątrz jak ma to miejsce, gdy badamy efekty kwantowej grawitacji w obserwowalnym Wszechświecie, lecz posiadają one status praw fizyki. Dopóty dopóki własności kwantowego Wszechświata będziemy opisywać w terminach równań różniczkowych będzie również immanentnie obecny problem wyboru warunków początkowych dla Wszechświata. Oczywiście, że tak, jak czynimy to w kosmologii relatywistycznej, możemy zdać się na testy obserwacyjne, które zawężą nam zbiór warunków początkowych (idea testowania i selekcji modeli kosmologicznych) lecz musimy mieć świadomość, że w przypadku Wszechświata efekty kwantowej grawitacji mogą być słabe, stąd trudne do testowania przez testy astronomiczne [48]. Otwarte jest pytanie czy jest jedyna możliwa droga do konstrukcji kosmologii kwantowej.

3. Twardy rdzeń programu badawczego kosmologii kwantowej nie pokrywa się z twardym rdzeniem programu kwantowej teorii grawitacji. Z punktu widzenia tej ostatniej, kosmologia jest traktowana jako fenomenologiczna aplikacja samej teorii grawitacji, która z kolei jest uważana za teorię fundamentalną. Nie jest nią kosmologia Hawkinga-Hartle'a, która jest zaledwie polem doświadczalnym dla dyskusji osobliwości i jej rozwiązania. W ten sposób (poza koncepcją Hawkinga-Hartle'a) problem kosmologiczny jest w zasadzie wtórny w stosunku do samej kwantowej grawitacji. Innymi słowy, celem programu badawczego kwantowej grawitacji jest zbudowanie teorii kwantowej grawitacji, która bez odwoływania się w punkcie wyjścia do kosmologii byłaby teorią fundamentalną. Teoria ewoluującego Wszechświata jest traktowana nie jest teorią fundamentalną, a jedynie jest ona obszarem jej aplikowalności. Ustawienie kosmologii w takiej roli, w której jest ona fizyką ewoluującego Wszechświata jest charakterystyczne począwszy od pierwszej pracy kosmologicznej Einsteina, który postawił tzw. problem kosmologiczny. Koncepcja fizyki zna jedynie koncepcję Milne'a, która szła niejako pod prąd i usiłowała wyprowadzić fizykę z modelu kosmologicznego. Należy mieć świadomość, że dopóty dopóki Wszechświat kwantowy będzie opisywany w terminach równań różniczkowych, które z definicji wyznaczają klasę rozwiązań, będziemy myśleć o kosmologii w kategoriach dziedziny z definicji fenomenologicznej, w której obserwacja odgrywa rolę mechanizmu selekcji modelu naszego Wszechświata, tj. selekcji warunków początkowych dla jego obserwowalnej formy.

4. Podstawowym kryterium odróżniającym oba programy są cele, które one sobie stawiają. Program kwantowej grawitacji za cel stawia sobie zbadanie efektów kwantowych w obecności silnych pól grawitacyjnych. Właśnie z tego powodu nie ogranicza się do pojęcia czasoprzestrzeni modeli kosmologicznych, spodziewając się przykładowo również znaczących efektów kwantowej grawitacji w obszarze czarnej dziury. Z kolei program kwantowej kosmologii jest już na samym początku w sytuacji wyboru czasoprzestrzeni dla modelu kosmologicznego. Wybór czasoprzestrzeni z metryką Robertsona-Walkera jest wyborem pragmatycznym, ale mamy świadomość, że ta geometria obowiązuje raczej w dzisiejszej epoce niż w bardzo wczesnym Wszechświecie, gdzie spodziewamy się, że efekty kwantowej grawitacji powinny być znaczące, a stąd efekty niejednorodności i anizotropii są znaczące.

5. Program kwantowej grawitacji jest uważany przez jego wykonawców za dokończenie rewolucji Einsteinowskiej, która odniosła ogromny sukces w zrozumieniu fundamentalnych pojęć jakimi są pojęcia czasu i przestrzeni. W przypadku programu kosmologii kwantowej stwierdzenie to nie wydaje się słuszne, jeśli mamy na uwadze dzisiejszy obraz Wszechświata. Gdy jednak cofniemy się do chwili, gdy prawdopodobna była tzw. faza *bounce*, zamiast osobliwości początkowej, to zmiana poglądu na temat natury samej osobliwości może nosić znamiona dokończonej rewolucji Friedmanowskiej – opisu ewoluującego Wszechświata na jego początku.

6. W przypadku programu badawczego kwantowej grawitacji, czy też kosmologii kwantowej zostaje bezlitośnie obnażona wada koncepcji Lakatosa polegająca na braku zdecydowanych kryteriów odrzucania konkurencyjnych programów badawczych. Do listy wymienionych już wcześniej programów badawczych można by dorzucić jeszcze kilka, np. kwantowanie kanoniczne, podejście zwane kwantową informacją i inne. Wypada się zgodzić z Feyerabendem, gdy ocenia metodologię Lakatosa jako werbalny ornament, pamiątkę po czasach, gdy przedsięwzięcia naukowe zależały od kilku prostych i racjonalnych reguł. Metodologia programów badawczych oferuje pewien język opisu procesu zmierzającego do konstrukcji kwantowej teorii grawitacji lecz nie jest w stanie oddać całej jego złożoności. Należy zgodzić się również z Feyerabendem, że konkurencyjnych teorii nie można porównywać przy pomocy języka logiki, a wybór teorii przez uczonego jest podyktowany przez czynnik czysto subiektywny. Różne konkurencyjne programy ustawicznie się zacierają. Bada się wewnętrzną niesprzeczność programów i ciągle ocenia jakie możliwości otwierają dla rozwiązania pojawiających się trudności. Preferencje wyboru programów podlegają ustawicznej krytyce, ale każdy z uczonych zna (a przynajmniej powinien znać) historię swojej

dziedziny badawczej i wie jakie są w niej problemy i co to znaczy je pokonać. Za największą wadę koncepcji Lakatosa uważam statyczność rekonstrukcji. Sam rdzeń jest sztywny lecz pas ochronny jest z natury dynamiczny

7. Rdzenie kwantowej teorii grawitacji rekonstruowane w pracy są zbiorem ogólnych hipotez.

Na rdzeń kwantowej teorii grawitacji składają się założenia i hipotezy:

- Kwantowa natura grawitacji
- Lokalny opis procesów kwantowych przy pomocy pojęć mechaniki kwantowej, niezależny od globalnych własności czasoprzestrzeni²
- Niezmienniczość opisu kwantowego względem transformacji układu współrzędnych (zasada ogólnej kowariancji).

Na rdzeń kosmologii kwantowej składają się następujące założenia:

- Wszechświat jest z natury obiektem kwantowym
- Procesy kwantowe rozgrywają się na tle czasoprzestrzennej struktury,
- Wszechświat jest tworem dynamicznym, którego ewolucja podlega równaniom Einsteina z czasem ciągłym lub dyskretnym.

8. Nasze doświadczenia nad weryfikacją koncepcji filozoficznej Lakatosa przez praktykę badawczą, która zmierza do zbudowania teorii kwantowej wskazują na to, że praktyka ta wymyka się poza ten typ formalizacji i rekonstrukcji. Proces rozwoju nauki jest układem złożonym. Możemy go oczywiście reflektować lecz zawsze wymyka się nam próbie formalizacji nie oddając złożoność różnych podejść. Nie sposób na podstawie aktualnych danych przewidzieć w oparciu o jego rekonstrukcję czy i kiedy teoria kwantowej grawitacji zostanie zbudowana. Sytuacja jest w pewnym sensie analogiczna do prognoz rynku finansowego. Gdybyśmy znali kursy walut jutro byłibyśmy bogatymi ludźmi, ale gdyby inni też posiadali taką wiedzę, to nie byłoby to już takie oczywiste, bo naukę tworzą żywi ludzie z ich pasjami, namiętnościami, wiedzą, doświadczeniami osobistymi, a te zmienne nie występują w rekonstrukcji nauki Lakatosa.

I tym nieco pesymistycznym akcentem kończymy nasze rozważania wrzucając Stevenowi Weinbergowi kamyczek do jego ogródka pod adresem: „Niezrozumiała nieskuteczność filozofii nauki w nauce” [49]. Uważam, że po drodze jednak zrozumieliśmy lepiej ideę zbudowania kwantowej teorii grawitacji. Udało się nam również wydobyć z

² Oczywiście znamy z mechaniki kwantowej pewne fakty wskazujące na nielokalność, jak np. nierówności Bella, czy eksperyment EPR. Tutaj chodzi raczej o niezależność od topologii czasoprzestrzeni.

rdzenia teorii jego fragment – nazwany prerdzieniem, który jest consensusem dla wszystkich możliwych, aktualnych i wiodących podejść. Wydobyć tych zasad uważam za osiągnięcie tej pracy. Pierwsza z tych zasad dotyczy kwantowej natury świata. Druga jest założeniem, że prawa fizyki są formułowane w postaci równań różniczkowych. Oznacza to istnienie pewnej pregeometrycznej struktury przestrzeni, na której one same są określone. Równania różniczkowe opisujące ewolucję układów są z czasem ciągłym lub z czasem dyskretnym. Oba te założenia nie są weryfikowalne i dotyczą natury samych praw.

Abstract

Modern approaches and attempts towards construction of quantum gravity theory and quantum cosmology are reconstructed in terms of Lakatos's conception of scientific program and its projective belt. The positive and negative heuristic is investigated in the context of quantum cosmology in Hartle-Hawking and Vilenkin approaches. We demonstrate that while the program of quantum cosmology is empirically degenerated, it becomes heuristically progressive. We pointed out role of Ambjorn, Loll and Jurkiewicz hypothesis of quantum dynamical triangulation which justifies conception of postponed rationality rather than conception of instant rationality. We argue that field of quantum gravity may be useful for incorporating some new ideas into the conceptions of philosophy of science.

Bibliografia

- [1] L a k a t o s I., *Falsification and Methodology of Scientific Research Programs*, I. Lakatos i A. Musgrave (red.), Criticism and the Growth of Knowledge, Cambridge University Press 1970, s. 91-196. Polski przekład: Falsyfikacja a metodologia naukowych programów badawczych, [w]: Pisma z Filozofii Nauk Przyrodniczych, tłum. Sady W., Warszawa, PWN 1995.
- [2] G r o b l e r A., *Metodologia Nauk*, Znak, Kraków 2006, s. 81.
- [3] www.filozofia.uni.opole.pl/teksty
- [4] C h a l m e r s A. F., *Czym jest to co zwiemy nauką? – rozważania o naturze, statusie i metodologii nauki. Wprowadzenie do współczesnej Filozofii Nauki*, Wydawnictwo Siedmiogród, Wrocław 1997.
- [5] M i e l c z a r e k J., S z y d ł o w s k i M., *Relic gravitons as the observable for Loop Quantum Cosmology*, arXiv: gr-qc/ 0705.4449 v.2.
- [6] F e y e r a b e n d P. K., *Consolation for the Specialist*, [w]: I. Lakatos i A. Musgrave (red.), Criticism and the Growth of Knowledge, Cambridge University Press, 1970, s. 197-230.
- [7] L a k a t o s I., *History of Science and its Rational Reconstructions*, [w]: R.C. Buck and R.S. Cohen (red.), PSA 1970. In Memory of Rudolf Carnap: Proceedings of the 1970 Biennial Meeting Philosophy of Science Association, Boston Studies in the Philosophy of Science vol. 8, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht-Holland 1971, s. 91-135.
- [8] W r ó b l e w s k i K., *Historia Fizyki*, PWN 2007.
- [9] F e y e r a b e n d P., *Against Method: Outline of an Anarchistic Theory of Knowledge*, New Left Books, London 1975.
- [10] S m o l i n L., *Trzy drogi do kwantowej grawitacji*, tłumaczenie J. Kowalski-Glikman, Wyd. CiS, Warszawa 2001.
- [11] G r e e n B., *Piękno Wszechświata*, Prószyński i S-ka, 2001.
- [12] G r e e n B., *Struktura kosmosu-przestrzeń, czas i struktura rzeczywistości*, Prószyński i S-ka, 2006.
- [13] G r e e n B., (2003), „Świat Nauki”, grudzień, s. 56–61.
- [14] V e n e z i a n o G., (2004), *Mit początku czasu*, „Świat Nauki”, Nr , s. 48-57.

- [15] B e k e n s t e i n J. B., (2003), *Informacja w holograficznym wszechświecie*, „Świat Nauki”, Nr, s.
- [16] F e y r a b e n d P., (1977), *Changing Patterns of Reconstruction*, “British Journal for the philosophy of Science”, Nr 28, s. 351-382.
- [17] Dla dyskusji filozoficznego znaczenia teorii strun, por.: H e d r i c h R., *String Theory –From Physics to Metaphysics*, [w]: Proceedings Conference “Physik seit Einstein”, Deutsche Physikalische Gesellschaft, Berlin 2005.
- [18] S o r k i n R. D., *Causal Sets: Discrete Gravity*, [w]: Proceedings of the Valdivia Summer School, 4.01.-14.01 2002, red. Gomberoff A., Marolf D., [arXiv: gr-qc/0309009].
- [19] C o n n e s A., *Noncommutative Geometry Year 2000*, arXiv: math/0011193.
- [20] Chciałbym czytelnikowi polecić interesującą bazę prac z linkami do prac na arXiv, która zawiera ważne prace w kontekście kwantowej teorii grawitacji. Citebase – How far are we from the quantum theory of gravity?
<http://www.citebase.org/abstract?identifier>. Istnieje również bardzo szczegółowa baza prac w dziedzinie pętlowej teorii grawitacji.
- [21] M a r k o p o u l o u F., *New directions in Background Independent Quantum Gravity*, arXiv: gr-qc/0703097.
- [22] B a e z J., (1998), *Spin Foam Models*, “Classical Quantum Gravity”, Nr 15, s. 1827-1858.
- [23] V o l o v i k G. E., *From Quantum Hydrodynamics to Quantum Gravity*, arXiv: gr-qc/0612134.
- [24] Podejście to było, i jest rozwijane przez: D r e y e r O., *Background Independent Quantum Field Theory and the Cosmology Constant Problem*, hep-th/0409048.
- [25] L l o y d S., *A theory of quantum gravity based on quantum computations*, arXiv: quant-ph/0501135.
- [26] K o n o p k a T., M a r k o p o u l o u F., S m o l i n L., *Quantum Graphity*, arXiv: hep-th/0611197.
- [27] A m b j o r n J., J u r k i e w i c z J., L o l l R., (2004), *Emergence of a 4D World from Casual Quantum Gravity*, “Physics Review Letters”, Nr 93 (131301).
- [28] B u t t e r f i e l d J., I s h a m , C. J., *Spacetime and the Philosophical Challenge of Quantum Gravity*, [w]: Physics meets Philosophy at the Planck Scale, red. Callender C., Huggett N., Cambridge University Press 2000, s. 33-89.

- [29] L o l l R., (1998), *Discrete approaches to quantum gravity in four dimensions*, “Living Reviews in Relativity”, Nr 1, s. 13.
- [30] B o m b e l l i L., C o r i c h i A., W i n k l e r O., (2005), *Semiclassical Quantum Gravity: Statistics of Combinatorial Riemannian Geometries*, Annalen Physics Nr 14, s. 499-519.
- [31] Ł u k a s i k A., *Filozofia Atomizmu*, UMCS, Lublin 2006.
- [32] I s h a m C. J., *Introduction to Quantum Gravity*, [w]: Isham C. J., Penrose R., Sciama, D. W. (red.), *Quantum gravity 2: A Second Oxford Symposium* Clarendon, Oxford, 1981, s. 2.
- [33] L e e T. D., (1986), *Physics in terms of Difference Equations*, [w]: *The Lesson of Quantum Theory*, de Boer J., Dal E., Ulfbeck O. (red.), , Elsevier, Amsterdam.
- [34] S z y d ł o w s k i M., G o d ł o w s k i W., S t a c h o w i a k T., *Cosmography in testing loop quantum gravity*, arXiv:0706.0283.
- [35] P a d m a n a b h a n T., *Dark Energy and Gravity*, arXiv: 0705.2533.
- [36] P a d m a n a b h a n T., *Gravity as an emergent phenomenon: A conceptual description*, arXiv:0706.1654.
- [37] W ü t h r i c h C., (2005), *To quantize or not to quantize: fact and folklore in quantum gravity*, “Philosophy of Science”, Vol. 72, s. 777-788.
- [38] C a l l e n d e r C., H u g g e t t N., eds. (2001a), *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale: Contemporary Theories in Quantum Gravity*, Cambridge University Press. (2001b), *Why Quantize Gravity (or Any Other Field for hat Matter)?*, Philosophy of Science 68 (Procc.), s. 382-394,
- [39] M a t t i n g l y J., (2005), *Is Quantum Gravity Neccesary?*, [w]; *The Universe of General Relativity: Einstein Studies*, Vol. 11, Jean Eisenstaedt, Anne Kox (red.), Birkäuser, Boston.
- [40] K o x A. J., E i s e n s t a e d t J., (red.), (2005), *The Universe of General Relativity*, Birkhäuser, Boston, s. 327-338.
- [41] V i s s e r M., (2002), *Sakharov’s Induced Gravity: a Modern perspective*, “Modern Physics Letters”, A 17, s. 977-992.
- [42] F i n k H., L e s c h k e H., (2000), *Is the Universe a Quantum system ?*, “Foundations of Physics Letters”, Vol. 13, Nr 4, s. 345-356.
- [43] F e y n m a n R. P., *Wykłady z grawitacji*, Prószyński i S-ka, 2006.
- [44] K o w a l s k i – G l i k m a n J., *Kwantowa grawitacja – posłowie*.
- [45] G o ł o s z J., *Spór o naturę czasu i przestrzeni*, Wyd. UJ, 2001.

- [46] S t a c h e l J., *Prolegomena to any future Quantum Gravity*, Archive: gr-qc/0609108.
- [47] S m o l i n L., Świat Nauki, 2007, T 76, s. 11.
- [48] S z y d ł o w s k i M., M i e l c z a r e k J., (2007), *Feynmana koncepcja absolutnej czasoprzestrzeni i niegeometrycznej teorii grawitacji*, w przygotowaniu.
- [49] W e i n b e r g S., *Sen o Teorii Ostatecznej*, Wyd. Alkazar, Warszawa 1994, s. 135.