

Marek Szydłowski

Program badawczy kosmologii kwantowej

Filozofia Nauki 16/1, 9-26

2008

Artykuł został opracowany do udostępnienia w internecie przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego. Artykuł jest umieszczony w kolekcji cyfrowej bazhum.muzhp.pl, gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach
dozwolonego użytku.

Marek Szydłowski

Program badawczy kosmologii kwantowej

STRESZCZENIE

W pracy pokazuję, że wysiłki zmierzające do konstrukcji kosmologii kwantowej i w ogólności kwantowej teorii grawitacji warto przedstawić w ramach metodologii programów badawczych Imre Lakatosa. Definiuję przedzień teorii sformułowany z najogólniejszych zasad tak, aby objąć różnorodność podejść. Do hipotez przedzenia zaliczam dwie hipotezy: kwantowej natury świata oraz jego opisu w terminach równań różniczkowych dyskretnych czy ciągłych. Dokonuję próby rekonstrukcji twardego rdzenia programu, tj. wiedzy zastanej z teorii grawitacji i teorii kwantowej. Wykazuję, 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 pokazuję, że degenerującego programu badawczego nie należy zarzucać i podaję przykłady hipotez ożywiających ten program (koncepcja Ambjorna, Loll, Jurkiewicza kausalnych triangulacji dynamicznych). Wskazuję również na hipotezy należące do pasa ochronnego (hipoteza pętlowej grawitacji, kwantowanie kanoniczne, koncepcja zbiorów kausalnych). Argumentuję, że heurystyka pozytywna programu badawczego kosmologii kwantowej i w ogólności kwantowej teorii grawitacji powinna się wiązać z modyfikacjami hipotez należących do pasa ochronnego. Podaję konkretny przykład, jakim jest kwantowa teoria dynamicznych triangulacji Ambjorna, Loll i Jurkiewicza, będąca argumentem za niezaruszeniem programu. Demonstruję, że program kwantowej grawitacji (kosmologii kwantowej) jest to program rozwijający się (choć niedojrzały w naszej terminologii), którego nie należy zarzucać.

1. WSTĘP

Koncepcję filozofii nauki Imre Lakatos'a należy rozumieć jako pewną próbę rozwiązania problemu rewizji wiedzy zastanej w duchu 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 oraz efektywny — otwiera możliwości odkrywania nowych zjawisk. Heurystyka negatywna programu polega na tym, że istnieje pewien нефalsyfikowalny zbiór założeń i hipotez — tzw. 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 (w szczególności: jakich technik matematycznych i eksperymentalnych możemy używać). W odróżnieniu od twardego rdzenia, tzw. pas ochronny (*protective 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].

Wszystkie programy badawcze Lakatos dzieli na postępowe i degenerujące się, przy czym bardzo ważne jest jego rozróżnienie na programy teoretycznie, empirycznie i heurystycznie postępowe. Z racji tego rozróżnienia dopuszczalna jest sytuacja, kiedy równocześnie będą rozwijane konkurencyjne, niezgodne ze sobą programy badawcze, zwłaszcza że na wczesnym etapie rozwoju weryfikacja empiryczna nie jest tak ważna, ponieważ teoretycznym badaniom daje się szansę pokazania (w możliwie nieskrepowany sposób) możliwości programu. Lakatos trafnie zauważa, że to, czego przede wszystkim wymagamy od programu badawczego, to nie jest odniesienie jakichś spektakularnych sukcesów czy też nowatorskie predykcje. Program badawczy może zawierać „niedojrzały” pas ochronny, zbliżający się dopiero do etapu, w którym jego hipotezy staną się podległe empirycznej weryfikacji.

Z tego rodzaju sytuacją mamy do czynienia we współczesnej kosmologii, gdzie obok programu badawczego kwantowej teorii grawitacji istnieje program badawczy oferowany przez teorię superstrun. W myśl koncepcji Lakatos'a należy zaakceptować to, 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 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. Pokażemy, że program kwantowej grawitacji ma status programu badawczego spełniającego pierwszy warunek i łamiącego drugi. Należy jednak pamiętać, że nie mamy tutaj do czynienia ze zdegenerowanym empirycznie programem badawczym (jak teoria Ptolemeusza 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, o tyle 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 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 nietrudno 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, że 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 wyraził 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 naukowych programów badawczych z dwóch punktów widzenia. 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 kwantowej grawitacji. Niemniej wysiłki badawcze grup naukowych zmierzają do 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 moż-

liwości testowania teorii i niemożności realizacji tego projektu z powodów obecnych ograniczeń technicznych.

Metodologia Lakatosa wyklucza te posunięcia naukowe w pasie ochronnym, które mają charakter stawiania hipotez *ad hoc* i których 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*). Jest to jednak sytuacja, którą Lakatos nazywałby, jak sądzę, sytuacją metodologicznego chaosu. Jego koncepcja dzięki postulatowi nienaruszalności twardego rdzenia wyklucza podobne sytuacje. 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 sprawdzaną nie następuje 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 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 dając nowe przewidywania odniósł przynajmniej chwilowy sukces, np. taki, jak potwierdzenie Eddingtona ugięcia promieni świetlnych w otoczeniu Słońca. Lakatos potwierdza, że fundamentalne znaczenie mają raczej potwierdzenia niż falsyfikacje.

W kontekście badania i rekonstrukcji rozwoju programu badawczego kosmologii kwantowej oraz kwantowej teorii grawitacji, 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, czy Cavendisha, który 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

tw. pętlową teorię grawitacji, rozwijaną przez Asthekara, Lewandowskiego i Bojowalda. Myślę jednak, że jest za wcześnie na radykalną krytykę tego programu i że należy dać mu 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. Już teraz zwraca się uwagę na sprawdziany czy testy obserwacyjne — w projekcie badań, w których autor niniejszej pracy uczestniczy.

W koncepcji programów badawczych nie odnajdujemy wyraźnego kryterium, które dałoby nam możliwość stwierdzenia, że gdy porównujemy dwa konkurencyjne programy badawcze, to ten-a-ten właśnie jest lepszy. Jest to niewątpliwie wada tej koncepcji, co właśnie było podstawą dla wspomnianego stwierdzenia Feyerabenda, iż metodologia Lakatosa jest „wербalnym ornamentem”. 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 i które uzasadniają krytykę Feyerabenda koncepcji programów badawczych. W koncepcji tej nie odnajdujemy niezachwianych kryteriów, które by wsparły uczonemu w ocenie sytuacji historycznej [9]. Jeśli potraktujemy metodologię jako naukę, która wypracowuje reguły, którymi później w praktyce badawczej kierują się uczeni, to, biorąc pod uwagę złożoność samej nauki, naiwne byłoby twierdzenie, że da się przewidywać przyszłe wyniki naukowe. To, czego jedynie możemy się nauczyć śledząc różne programy badawcze *in statu nascendi*, to to, że brak jest reguł, które by uczonemu powiedziały, co ma robić. Są jednak pewne standardy, które wspierają uczonemu w jego decyzjach. W następnych rozdziałach będziemy się starać ilustrować taki stan rzeczy na przykładzie ewolucji programu badawczego kosmologii kwantowej.

2. TWARDY RDZEŃ PROGRAMU KWANTOWEJ GRAWITACJI I KOSMOLOGII KWANTOWEJ — PRÓBA REKONSTRUKCJI

Zagadnienie rekonstrukcji twardego rdzenia kwantowej teorii grawitacji jest zagadnieniem złożonym i mam 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 twarde rdzenie jest нефalsyfikowalny. Sformułujemy zasady tworzące prerdzeń, rdzeń i podrzeń wiodącego nurtu.

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

1. Koncepcja Hawkinga–Hartle’a funkcji falowej dla Wszechświata.

2. Koncepcja kauzalnych triangulacji sformułowana przez Ambjorna, Loll 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 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 omówienia poszczególnych dróg do kwantowej grawitacji. W takim a nie innym wyborze kierowałem się zasadą spójności tych podejść, które w pewnym sensie wyrastają ze wspólnego podłoża. Możliwy byłby i inny wybór. Lee Smolin w swojej książce *Trzy drogi do kwantowej grawitacji* wymienia np. teorię grawitacji, koncepcję dynamicznych triangulacji oraz teorię superstrun [10]. Nie jest jednak moim celem popularyzowanie tej ostatniej teorii — zwłaszcza w kontekście istnienia niedoścignionego ideału popularyzacji, jakim jest książka jednego z twórców tej teorii Briana Greena [11, 12, 13, 14].

Zdecydowałem się wyłączyć teorię superstrun z ogólnego schematu, chociaż teoria ta z definicji jest kwantowa, także dlatego, że jest ona pojęciowo niewspółmierna z pozostałymi teoriami, które posłużą nam do rekonstrukcji rdzenia. Na jeszcze inny powód takiego wyłączenia zwrócił ostatnio uwagę prof. Andrzej Staruszkiewicz w dyskusji podczas Krakowskiej Konferencji 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.

Oprócz teorii superstrun dla wymienionych wyżej powodów nie włączyłem tzw. teorii zbiorów kauzalnych [18] oraz pominąłem ważny nurt tzw. niekomutatywnej geometrii [19]. Lista pominiętych podejść do kwantowania grawitacji jest zresztą 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].

W tym miejscu warto w obszernym nawiasie powiedzieć parę słów o możliwości różnych podejść do kwantowej teorii grawitacji. Ostatnio bardzo interesującą uwagę

na ten temat poczynił Fotoni Markopoulou [21]. Stwierdził on — a ja podzielałam ten pogląd — że można dokonać klasyfikacji tych podejść biorąc pod uwagę dwa kryteria:

1. Status czasoprzestrzennej geometrii (pyta się o to, 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. Charakter czasoprzestrzeni (pyta się o to, czy czasoprzestrzeń jest zadana, statyczna, 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 przyjrzymy się teorii superstrun, to w tej teorii OTW jest emergentna, natomiast czasoprzestrzeń jest ustalona od samego początku (absolutna) i nie podlega dynamicznej ewolucji. Do drugiego typu można by zaliczyć: pętlową teorię grawitacji, teorię spinowej piany kwantowej, teorię dynamicznych triangulacji czy teorię zbiorów kauzalnych [22]. W tych podejściach geometria oraz grawitacja są ciągle traktowane jako 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 określona przez superpozycję geometrii czasoprzestrzeni, a stąd geometria nie jest zadana, tzn. nie ma charakteru absolutnego. W naszej rekonstrukcji rdzenia wymienione właśnie w tym punkcie podejścia znajdują się w pasie ochronnym programu kwantowej grawitacji. Do tego samego typu należą też klasyczne podejścia, takie jak kwantowanie kanoniczne, czy też podejście Hawkinga–Hartle’a, w których status czasoprzestrzeni oraz relacyjność pojęcia czasu i przestrzeni są 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.

Podejścia czwartego typu można by nazwać podejściami pregeometrycznymi i niezależnymi od tła (*pre-geometric background independent approach*). Punktem wyjścia podejścia tego rodzaju jest teoria mikroskopowa układów kwantowych, w której nie odnajdujemy odniesień do czasoprzestrzennej geometrii. Tak grawitacja, jak i geometria są emergentne. Geometria jest tutaj definiowana wewnętrznie przy pomocy tych układów 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.

Obecnie na gruncie podejść do kwantowej teorii grawitacji toczy się ważny filozoficzny spór, dotyczący statusu grawitacji, pojęcia czasoprzestrzeni i tego, co jest fundamentalne, opis kwantowy czy klasyczny. Czy kwantowe stopnie swobody po-

winy być geometryczne? Jaka powinna być rola pojęcia czasoprzestrzeni w teorii kwantowej?

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 na kilku zasadach. Wyobrażam sobie, że zasady prerdzienia winny być bardzo ogólne i mogą mieć charakter założeń filozoficznych. Wielu fizyków, wśród nich Richard Feynman, uważa założenie, że materia składa się z atomów, za najważniejsze założenie we współczesnej fizyce. Wyobrażam sobie, że w skład założeń prerdzienia wchodzi analogiczne zasady, jak np. w fizyce przyrody założenie atomistycznego modelu świata [31]. Zasady te będą składać się na to, co nazwiemy prerdzieniem — punktem wyjścia każdego podejścia. Następnie do zasad prerdzienia dorzucimy nowe zasady tak, aby zrekonstruować nowy program badawczy kwantowej grawitacji. Moje propozycje zasad fundamentalnych są następujące:

ZASADA 1 FUNDAMENTALNOŚCI TEORII KWANTOWEJ: FUNDAMENTALNE
TEORIE FIZYCZNE POWINNY BYĆ Z NATURY TEORIAMI 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. Jest jedynie 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.

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 nierozciągniętym 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 konstrukcji 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 poka-

zać, 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 DYSKRETNÝCH).

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

Pojęcie czasoprzestrzennej rozciągłości 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 ciągle continuum. Dobitnie to wyraża Isham, gdy pisze: „Perhaps the entire paraphernalia of differential geometry is only appropriate at scales greater 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 bardzo interesującym działem matematyki.

Alternatywne do zasad (2) i (2') jest przykładowo formułowanie praw fizyki (czy Wszechświata) w języku kombinatoryki czy też statystyki (np. macierzy losowych). Zauważmy, że jeśli prawa fizyki są formułowane w języku równań różniczkowych, to wylania się podstawowa trudność z ich aplikacją do Wszechświata jako całości — problem warunków początkowych. O ile dla efektów 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 mają status praw fizyki.

Inną sprawą jest zagadnienie wyboru modelu dla realnego Wszechświata. Ponieważ prawa fundamentalne są określone w języku równań różniczkowych, to 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 testowalne, 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 słabych z definicji efektów kwantowych w obecnej klasycznej epoce. Gdy fundamentalna teoria grawitacji jest kwantowa, wówczas nowego wymiaru nabierze wyprowadzenie i testowanie OTW jako niskoenergetycznej 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 ma 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 próbkujemy ją w skali Plancka. Kiedy badamy ciało stałe, wtedy wyróżniamy trzy różne poziomy opisy: 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 stojące 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 do obszarów silnych pól grawitacyjnych (np. czarne dziury) czy też na 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), przy-

mujemy zarazem, że pole grawitacyjne musi z konieczności w takiej teorii mieć charakter kwantowy? Pytanie takie było stawiane wcześniej przez Callendera i Huggetta [38, 39, 40]. Odpowiedź przywołanych autorów jest negatywna, tzn. w tym kontekście przywoływany jest przykład, w którym do równań Einsteina wchodzą 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 $\langle \Psi | T_{\mu\nu} | \Psi \rangle$ jest wartością oczekiwaną (średnią) dla kwantowego stanu pola Ψ .

Wówczas równania Einsteina dotyczą kwantowości materii, 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 absolutną rozmaitość tła, na której rozgrywają się procesy kwantowe opisywane przez kwantową teorię pola. 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 istnieje 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 — jest to przestrzeń Minkowskiego — natomiast pole grawitacyjne spełnia równania analogiczne do Einsteinowskich równań pola (posługujemy się tu analogią do elektrodynamiki [43, 44]). Teoria ta jest bardzo interesująca z punktu widzenia sporu między absolutyzmem i relacjonizmem [45].

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

Nasza dalsza strategia zmierza w kierunku zawężenia możliwych podejść do podejścia 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 należy pamiętać, że rekonstrukcja nie określa dyrektyw dla konstrukcji poprawnej teorii kwantowej grawitacji.

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 tła.
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 składające się na twardy rdzeń wiodącego programu badawczego zestawiono poniżej, gdzie podano tylko dodatkowe tezy do wcześniejszych zasad minimum składających się na przedzeń tego programu.

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 opartym na całkach 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 (całkę funkcjonalną) po możliwych historiach wnoszących wkład do amplitudy przejścia między stanami. Podejście to zostało zaproponowane w 1948 roku przez 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 grawitacji.¹ Teoria ta dostarcza również technik liczenia całki funkcjonalnej, rozkładając czasoprzestrzeń na 4-sympleksy (czterowymiarowe analogi zwykłych czworościanów). Kluczowym pomysłem zastosowanym w tym podejściu jest sumowanie tylko po takich historiach, które nie łamią warunku kauzalności. Przyjęcie takiego założenia pozwoliło w roku 2004 Loll, Ambjornowi i 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 matematyce spotkać dowody wspomagane numerycznie i w pełni akceptowalne. Wydaje się, że potrzebowaliśmy pewnego czasu, aby sobie uświadomić, że wyniki numeryczne są równie ściśle jak wyniki analityczne, a czasami są one jedynymi możliwymi wynikami, ponieważ taka jest natura samego problemu. Dzisiaj mówimy o matematyce eksperymentalnej jako pełnoprawnym dziale matematyki, co oznacza, że w 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 W teorii Ambjorna, Loll i Jurkiewicza startujemy z działania Hawkinga–Hartle’a, ale zdystrybowanego. 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.

1. Priorytetem jest przezwyciężenie wewnętrznych trudności, co można uznać za główną motywację do jego rozwijania. Jest to etap, w którym program nie ma jeszcze spektakularnych sukcesów w postaci odkryć nowych zjawisk czy potwierdzeń empirycznych, ale już posiada pewne sukcesy polegające na rozwiązaniu niektórych trudności wcześniejszego programu klasycznej teorii grawitacji. Teorie fizyczne mają zawsze pewien zakres aplikowalności, tzn. istnieje pewna granica, poza którą teoria nie może być ekstrapolowana. Takie wewnętrzne obcięcie („*cut off*”) ma 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 pętłowa teoria grawitacji. Osobliwości początkowe są postrzegane nie jako granice naszego poznania, lecz jako obciążenia samej teorii. 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 teoretycznie postępowych z prognozami postępu empirycznego, ale bez jakichś spektakularnych sukcesów obserwacyjnych czy też predykcji nowych zjawisk. Tutaj moja praca z Mielczarkiem [5] 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 rozwiązania 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 mają 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 Wszech-

świata 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 nie jest teorią fundamentalną, a jedynie jest ona obszarem aplikowalności takiej teorii. Ustawienie kosmologii w takiej roli, w jakiej jest ona fizyką ewoluującego Wszechświata, jest standardowe począwszy od pierwszej pracy kosmologicznej Einsteina, który postawił tzw. problem kosmologiczny. Historia fizyki zna jedynie koncepcję Milne’a, która szła niejako pod prąd i usiłowała wyprowadzić fizykę z modelu kosmologicznego. Należy mieć świadomość, że dopóki Wszechświat kwantowy będzie opisywany w terminach równań różniczkowych, które z definicji wyznaczają klasę rozwiązań, dopóty 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 — a stąd efekty niejednorodności i anizotropii — powinny być 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, wtedy zmiana poglądu na temat natury samej osobliwości może nosić znamiona dokończo-

nej rewolucji Friedmanowskiej — opisu ewoluującego Wszechświata na jego początku.

6. 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 za pomocą 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.

7. Nasze doświadczenia z weryfikacją koncepcji filozoficznej Lakatosa przez praktykę badawczą, która zmierza do zbudowania teorii kwantowej, wskazują na to, że praktyka ta wymyka się — częściowo — temu typowi formalizacji i rekonstrukcji. Proces rozwoju nauki jest układem złożonym. Nie sposób na podstawie aktualnych danych przewidzieć, w oparciu o jego rekonstrukcję, czy i kiedy teoria kwantowej grawitacji zostanie zbudowana. Naukę tworzą żywi ludzie z ich pasjami, namiętnościami, wiedzą, doświadczeniami osobistymi, a te zmienne nie występują w rekonstrukcji nauki Lakatosa. Uważam, że mimo to program ten pozwala jednak lepiej zrozumieć ideę zbudowania kwantowej teorii grawitacji. Udało się nam w szczególności wydobyć z rdzenia teorii jego fragment — nazwany prerdzieniem, który jest consensusem dla wszystkich aktualnych i wiodących podejść. Wydobycie tych zasad uważam za osiągnięcie tej pracy.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Lakatos I. (1970), *Falsification and Methodology of Scientific Research Programs*, [w:] *Criticism and the Growth of Knowledge*, red. Lakatos I., Musgrave A., Cambridge University Press., Polski przekład: Sady W. (1995), *Falsyfikacja a metodologia naukowych programów badawczych*, [w:] *Pisma z filozofii nauk przyrodniczych*, Warszawa, PWN.
- [2] Grobler A. (2006), *Metodologia nauk*, Kraków, Znak.
- [3] www.filozofia.uni.opole.pl/teksty
- [4] Chalmers A. F. (1997), *Czym jest to, co zwiemy nauką? — rozważania o naturze, statusie i metodologii nauki. Wprowadzenie do współczesnej filozofii nauki*, Wrocław, Wydawnictwo Siedmioróg.

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.

- [5] Feyerabend P. K. (1970), *Consolation for the Specialist*, [w:] *Criticism and the Growth of Knowledge*, red. Lakatos I., Musgrave A., Cambridge University Press.
- [6] Lakatos I. (1971), *History of Science and its Rational Reconstructions*, [w:] *In Memory of Rudolf Carnap: Proceedings of the 1970 Biennial Meeting Philosophy of Science Association, Boston Studies in the Philosophy of Science*, vol. 8, red. Buck R. C., Cohen R. S., Dordrecht, D. Reidel Publishing Company.
- [7] Feyerabend P. (1975), *Against Method: Outline of an Anarchistic Theory of Knowledge*, London, New Left Books.
- [8] Smolin L. (2001), *Three Roads to Quantum Gravity*, New York, Basic Books.
- [9] Green B. (2001), *Piękno Wszechświata*, Warszawa, Prószyński i S-ka.
- [10] Green B. (2006), *Struktura kosmosu — przestrzeń, czas i struktura rzeczywistości*, Warszawa, Prószyński i S-ka.
- [11] Green B. (2003), *Przyszłość teorii strun*, „Świat Nauki”, Nr 12 (148), s. 56-61.
- [12] Veneziano G. (2004), *Mit początku czasu*, „Świat Nauki”, Nr , s. 48-57.
- [13] Sorkin R. D. (2002), *Causal Sets: Discrete Gravity*, [w:] *Proceedings of the Valdivia Summer School*, red. Gomberoff A., Marolf D., [arXiv: gr- qc/0309009].
- [14] Connes A. (2000), *Noncommutative Geometry Year 2000*, arXiv: math/0011193.
- [15] Chciałbym czytelnikowi polecić interesująca 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.
- [16] Markopoulou F. (2007), *New directions in Background Independent Quantum Gravity*, arXiv: gr-qc/0703097.
- [17] Baez J. (1998), *Spin Foam Models*, „Classical Quantum Gravity”, Nr 15, s. 1827-1858.
- [18] Volovik G. E. (2006), *From Quantum Hydrodynamics to Quantum Gravity*, arXiv: gr-qc/0612134.
- [19] Podejście to było, i jest rozwijane przez: Dreyer O. (2005), *Background Independent Quantum Field Theory and the Cosmology Constant Problem*, hep-th/0409048.
- [20] Lloyd S. (2005), *A theory of quantum gravity based on quantum computations*, arXiv: quant-ph/0501135.
- [21] Konopka T., Markopoulou F., Smolin L. (2006), *Quantum Graphity*, arXiv: hep-th/0611197.
- [22] Łukasik A. (2006), *Filozofia atomizmu*, Lublin, UMCS.
- [23] Isham C. J. (1981), *Introduction to Quantum Gravity*, [w:] *Quantum gravity 2: A Second Oxford Symposium Clarendon*, red. Isham C. J., Penrose R., Sciama D. W., Oxford.
- [24] Lee T. D. (1986), *Physics in terms of Difference Equations*, [w:] *The Lesson of Quantum Theory*, red. de Boer J., Dal E., Ulfbeck O., Amsterdam, Elsevier.
- [25] Szydłowski M., Godłowski W., Stachowiak T. (2007), *Cosmography in Testing Loop Quantum Gravity*, arXiv:0706.0283.
- [26] Padmanabhan T. (2007a), *Dark Energy and Gravity*, arXiv: 0705.2533.
- [27] Padmanabhan T. (2007b) *Gravity as an Emergent Phenomenon: A Conceptual Description*, arXiv:0706.1654.
- [28] Wüthrich C. (2005), *To Quantize or Not to Quantize: Fact and Folklore in Quantum Gravity*, „Philosophy of Science”, Vol. 72, s. 777-788.
- [29] Callender C., Huggett N. (2001a), *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale: Contemporary Theories in Quantum Gravity*, Cambridge University Press.
- [30] Callender C., Huggett N. (2001b), *Why Quantize Gravity (or Any Other Field for hat Matter)?*, „Philosophy of Science”, 68 (Proc.), s. 382-394.

- [31] Mattingly J. (2005), *Is Quantum Gravity Necessary?*, [w:] *The Universe of General Relativity (Einstein Studies)*, Vol. 11, red. Eisenstaedt J., Kox A., Boston, Birkäuser.
- [32] Kox A. J., Eisenstaedt J. (2005), *The Universe of General Relativity*, Boston, Birkhäuser.
- [33] Visser M. (2002), *Sakharov's Induced Gravity: a Modern perspective*, „Modern Physics Letters”, A 17, s. 977-992.
- [34] Fink H., Leschke H. (2000), *Is the Universe a Quantum System?*, „Foundations of Physics Letters”, Vol. 13, Nr 4, s. 345-356.
- [35] Feynman R. P. (2006), *Wykłady z grawitacji*, Warszawa, Prószyński i S-ka.
- [36] Gołosz J. (2001), *Spór o naturę czasu i przestrzeni*, Kraków, Wyd. UJ.
- [37] Alpert M. (2007), *Wszechświat z trójkątów*, „Świat Nauki”, Nr 2 (186), s. 11.
- [38] Mielczarek J., Szydłowski M. (2007a), *Relic Gravitons as the Observable for Loop Quantum Cosmology*, arXiv: gr-qc/ 0705.4449 v.2.
- [39] Szydłowski M., Mielczarek J. (2007b), *Feynmana koncepcja absolutnej czasoprzestrzeni i niegeometrycznej teorii grawitacji*, w przygotowaniu.