



**prof. dr hab. Mariusz P. Dąbrowski**  
**Instytut Fizyki, Wydział Matematyczno-Fizyczny,**  
**Uniwersytet Szczeciński**

ul. Wielkopolska 15, 70-451 Szczecin  
tel./fax: (+48) 91 4441248  
<http://cosmo.usz.edu.pl>

[Mariusz.Dabrowski@usz.edu.pl](mailto:Mariusz.Dabrowski@usz.edu.pl)

Szczecin, 11.02.2019

***Ocena osiągnięcia naukowego pt. „Dynamika wczesnego Wszechświata w pętlowej kosmologii kwantowej” przedstawionego do postępowania habilitacyjnego oraz dorobku naukowego, dydaktycznego i organizacyjnego dra Tomasza Pawłowskiego***

**I. Ocena osiągnięcia, o którym mowa w art. 16 ust. 2 Ustawy o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.**

Dr Tomasz Pawłowski przedstawił jako osiągnięcie naukowe imponujący cykl dziewiętnastu jednotematycznych publikacji dotyczących jednego z najnowszych podejść do kwantowej grawitacji i kosmologii jakim jest podejście pętlowe (LQG i LQC – kwantowa grawitacja pętlowa i kwantowa kosmologia pętlowa). Jest to cykl w zdecydowanej większości (z wyjątkiem dwóch prac) współautorski – choć w gronie znakomitych i utytułowanych fizyków (m.in. A. Ashtekar, J. Lewandowski, M. Mena-Marugan, P. Singh) – w którym zgodnie z przedstawionymi oświadczeniami konkretnie opisany jest zarówno jakościowy, jak też ilościowy (w wysokości od 25% do 80%) wkład habilitanta. We wszystkich pracach z wyjątkiem 14 (80% wkładu) zastosowano kolejność alfabetyczną.

Korzystając z bazy fizyki cząstek elementarnych INSPIRE całkowita liczba cytowań przedstawionego cyklu jest także imponująca i wyniosła ponad 2000. Najważniejszymi i mającymi przełomowy charakter dla dziedziny są prace 1-3 z ponad 1500 cytowaniami napisane z twórcą koncepcji i swoistym „guru” pętlowej grawitacji kwantowej Abhay Ashtekarem. Oczywiście pojawiły się także liczne prace z innymi specjalistami kosmologii kwantowej, co świadczy o bardzo dobrej interakcji habilitanta z wieloma fizykami głównie przy okazji odbytych 4 staży podoktorskich w latach 2005-2015. Prawdopodobnie habilitant najlepszą synergię osiąga współpracując z innymi o czym może świadczyć fakt, iż jedyne dwie samodzielne prace 17 i 18, choć stosunkowo świeże, w porównaniu ze skalą innych prac, mają dosyć mały odbiór (tylko 7 cytowań). Natomiast patrząc na całkowity dorobek habilitanta wraz ze współautorami oceniany odbiorem środowiska fizyków, to osiąga on ponad 2500 cytowań z indeksem Hirscha  $h=21$  (na 42 prace w dorobku). Szczególną uwagę zwraca równomierny (niemal „gaussowski”) rozkład wpływu prac: 14 prac ma ponad 50 cytowań, 13 prac 10-50 cytowań, a pozostałe 15 poniżej 10, co wskazuje na ich dużą istotność.



Aby dokładnie przyjrzeć się wkładowi własnemu habilitanta do osiągnięcia naukowego, należy przeanalizować oświadczenia współautorów. I tak zgodnie z deklaracjami A. Ashtekara oraz P. Singha z 15.03.2018 można wywnioskować, iż habilitant przy powstawaniu prac 1-3 był przede wszystkim odpowiedzialny za część numeryczną, główne idee matematyczne związane z implementacją wiązu Hamiltonowskiego do kosmologii leżały po stronie A. Ashtekara, a interpretacja fizyczna całości pracy po stronie P. Singha. Z kolei w pracy nr 14 wkład habilitanta był dominujący (analiza matematyczna modelu z dodatnią stałą kosmologiczną, analiza rozszerzeń samosprzężonych operatora ewolucji, rozszerzenie numerycznych narzędzi LQC), co jak już było wspomniane odzwierciedla umieszczenie Jego nazwiska na liście autorów na pierwszym miejscu. Złożona przez A. Ashtekara deklaracja dotycząca pracy nr 28, w której habilitant dokonał systematycznej analizy własności kwantowych zamkniętego modelu Friedmanna w formalizmie LQC jest dodatkowa, ponieważ nie dotyczy głównego osiągnięcia przedstawionego do oceny. Z kolei analiza oświadczenia współautora Guillermo A. Mena-Marugan (prace 4, 6, 7, 11) wskazuje na istotny wkład tegoż w sformułowanie ogólnych idei matematycznych i fizycznych, natomiast rolą habilitanta było ich rozwinięcie i analiza numeryczna. Na uwagę zasługuje dominujący (80%) wkład T. Pawłowskiego w pracę 7, w której zdefiniował On i zastosował metody opisu dynamiki układów próżniowych w LQC.

Natomiast nie wiem, czy jest moim przeoczeniem, czy też faktem, iż w załączonym zbiorze oświadczeń brakuje oświadczenia Jerzego Lewandowskiego.

Kwantowa grawitacja pętlowa i oparta na niej kwantowa kosmologia pętlowa są jednymi z najważniejszych osiągnięć współczesnej fizyki teoretycznej zmierzającej do stworzenia teorii kwantowej grawitacji. To podejście konkuruje z kilkoma innymi wśród których jest teoria superstrun oraz dynamiczna triangulacja. Głównym problemem dowolnej teorii kwantowej grawitacji jest brak możliwości jej weryfikacji w eksperymencie i jak się wydaje, poza jej niskoenergetycznymi aspektami, najlepszą ścieżką ich testowania może być kosmologia. Wczesna wysokoenergetyczna faza ewolucji Wszechświata mogła bowiem pozostawić pewne charakterystyczne dla jednej z tych teorii relikty, które mogą jednoznacznie poinformować nas o jej stosowalności. Dlatego sensowne jest rozwijanie kwantowej kosmologii pętlowej (LQC) zapoczątkowanej licznymi pracami Martina Bojowalda w oparciu o pierwotną koncepcję kwantowej grawitacji pętlowej (LQG) stworzonej przez Abhay Ashtekara, w co włączył się habilitant.

Głównym osiągnięciem podejścia pętlowego do kosmologii jest generyczna możliwość uniknięcia stanu osobliwego na początku ewolucji Wszechświata (efekt ten został po raz pierwszy zauważony przez Martina Bojowalda w 2001 roku). Popularnie środowisko grawitacji pętlowej nazywa ten efekt „wielkim odbiciem” i jest on tutaj następstwem dyskretnej natury czasoprzestrzeni. Pomimo, iż taki efekt jest możliwy także w klasycznych teoriach grawitacji, to albo nie jest on wystarczająco ogólny, albo wymaga specyficznych warunków fizycznych (dyssypacja energii, wprowadzenie niestandardowych pól fizycznych, dodatkowych wymiarów itp.). Bez wątplenia dowiedzenie generyczności tego efektu w LQC w dużej mierze jest zasługą habilitanta jako następstwo prac 1-3. W tych pracach habilitant rozważał konkretne modele geometrii czasoprzestrzeni w kontekście formalizmu LQC. Pierwszym takim modelem był płaski



model Friedmanna z najprostszym bezmasowym polem skalarnym, który jest równoważny fenomenologicznemu modelowi cieczy gęstej (stiff-fluid). Na uwagę zasługuje opracowanie ścisłej konstrukcji kwantowej przestrzeni Hilberta, która posłużyła do analizy zachowania się Wszechświata a także użycie jednego ze stopni swobody (pola skalarnego) jako współrzędnej czasowej (zegara). Habilitant miał wkład w budowę struktur matematycznych teorii a przede wszystkim w obliczenia numeryczne. Należy podkreślić, iż prace 1-3 stworzyły fundament do dalszej analizy kolejnych modeli geometrycznych i polowych, potwierdzający generyczną nieosobliwość kosmologii pętlowych oraz wiele innych efektów fizycznych. Warto zwrócić uwagę, iż podobne wyniki charakteryzujące się stanem nieosobliwym na początku ewolucji pojawiają się w alternatywnym podejściu do teorii kwantowej grawitacji, mianowicie w teorii wszechświatów membranowych Randall-Sundrum.

Mając wytworzone ramy podstawowe teorii LQC, habilitant w kolejnych pracach zajął się rozszerzaniem dyskusji na kolejne konfiguracje takie jak model płaski Friedmanna ze stałą kosmologiczną oraz model z materią pyłową (prace 13, 14). Okazało się, iż większość obliczeń w przypadkach tych prostych geometrii można było wykonać analitycznie i to był właśnie największy wkład habilitanta. W pracy 33 (nie wchodzącej w skład „osiągnięcia”), w której nastąpiło rozszerzenie na materię promienistą, rozważano użycie tej materii do pomiaru czasu (zegara).

Wychodząc z klasycznych rozważań opartych o ogólną teorię względności Einsteina kolejnymi konfiguracjami do zbadania pozostawały geometrie anizotropowe i niejednorodne. I tak habilitant w pracy 4 przeszedł do analizy najprostszego uogólnienia modelu izotropowego – Bianchi I – płaskiego anizotropowego modelu Wszechświata. Pojawiające się trudności w sformułowaniu analitycznym pełnego kwantowego modelu (wykonane dopiero niedawno przez habilitanta w cytowanej pracy [20]) nie przeszkodziły Mu w udowodnieniu za pomocą analizy numerycznej, iż także dla tej konfiguracji geometrycznej możliwe jest „wielkie odbicie”. Kolejnym krokiem było rozważenie modelu niejednorodnego typu Gowdy w celu zbadania jak mogą zachowywać się niejednorodności czasoprzestrzeni w warunkach modelu pętlowego. Tutaj jednak zastosowano metodę hybrydową – anizotropowe stopnie swobody były kwantowane metodami LQG, natomiast niejednorodne stopnie swobody potraktowane jako mody Fouriera były kwantowane albo metodą Focka, albo metodą nieperturbacyjną midisuperspace znaną z kwantowania czasoprzestrzeni sferycznie symetrycznych. Pierwsza metoda została użyta w pracach 6 i 11, a jej głównym osiągnięciem było zbadanie przejścia modów niejednorodnych przez fazę nieosobliwą we wczesnym wszechświecie. Habilitant, wraz z opiekunem G. Mena-Marugan, miał tu wkład w postaci sformułowania problemu badawczego oraz częściowych obliczeń, natomiast główne obliczenia zostały wykonane przez doktoranta. Druga metoda została zastosowana w pracy 19. Tutaj habilitant wykonał uśrednianie po grupie w celu identyfikacji stanów kwantowych modelu Gowdy, identyfikacji i opisu stanów asymptotycznych oraz zbadaniu granicy niskich energii z przewidywaniami teorii Einsteina.

Jednym z istotnych elementów danego modelu kosmologicznego jest poszukiwanie jego istotnych cech, które mogą sugerować zgodność z obserwacjami lub przynajmniej z ogólnym scenariuszem ewolucji Wszechświata. Jednym z takich istotnych elementów oprócz generacji zaburzeń gęstości jest możliwość uzyskania gwałtownie przyspieszonej ekspansji na początku



ewolucji Wszechświata pozwalającej na rozwiązanie problemu horyzontu, czyli dopuszczenie tzw. kosmologicznej inflacji. Habilitant zajmował się tym zagadnieniem w pracy 15 rozważając na początek pole skalarne nieminimalnie sprzężone z grawitacją oraz potencjałem samooddziaływania. Po przejściu do układu Einsteina, w którym pole skalarne stało się minimalnie sprzężone, pojawił się efekt podwójnego wielkiego odbicia. W pracy tej habilitant wykonał większość obliczeń numerycznych i część analitycznych.

Poza powyższymi osiągnięciami, warto również zwrócić uwagę na wkład habilitanta do rozwoju struktury matematycznej teorii LQC, który był przedstawiony w pracach 8, 10, 5, 14 i 16. W pracy 8 badany był problem zależności reparametryzacji czasu od struktury sektora dynamicznego LQC. Okazało się, że deparametryzacja czasu polem skalarnym prowadzi do wielości rozszerzeń samosprzężonych generujących nierównoważną unitarną ewolucję, podczas gdy w przypadku prostego wyboru funkcji laps ( $N=1$ ) wiąz hamiltonowski jest samosprzężony. Z kolei prace 5 i 10 były poświęcone własnościom obserwabli w kwantyzacji pętlowej, a prace 14 i 16 konstrukcji odpowiednich przestrzeni Hilberta oraz sektorom superselekcji. Habilitant wypracował tutaj specjalną konstrukcję pokonującą problemy związane z nieośrodkowością kinematycznych i fizycznych przestrzeni Hilberta używającą wciąż sektorów superselekcji, ale pozwalającą na rozwłóknienie całkowitej przestrzeni Hilberta, która okazywała się być przestrzenią ośrodkową. To podejście dało dobrą dynamikę modeli niskoenergetycznych Bianchi I.

Najważniejszym zadaniem jakie pojawia się przed LQC jest znalezienie jej prawidłowej relacji do LQC jako pełnej teorii kwantowej grawitacji (praca (19)). Chociaż LQC daje odpowiedzi na pytania związane z konkretnymi obserwabliami, to już ekstrapolacja jej wyników do pełnej LQG nie jest tak oczywista. Istotnym osiągnięciem habilitanta było zidentyfikowanie konkretnych obiektów w obu teoriach i określenie ich wzajemnej korespondencji. Oczywiście, LQC jest teorią uproszczoną chociaż zachowującą kluczowe własności LQG.

Reasumując, po dokonaniu powyższej analizy, a także biorąc pod uwagę oświadczenia zarówno habilitanta jak i współautorów mogę stwierdzić, że dr T. Pawłowski ma wystarczający wkład w przedstawionym do oceny osiągnięciu naukowym i wobec tego spełniony jest warunek formalny autorstwa tego osiągnięcia. Bardzo podoba mi się szczegółowe przedstawienie jakościowe tego wkładu w autoreferacie, a nie tylko ilościowe (procentowe).

Opisane osiągnięcie stanowi znaczący wkład habilitanta w rozwój kwantowej kosmologii pętlowej i bez wątpienia może służyć jako podstawa nadania stopnia doktora habilitowanego.

## **II. Ocena aktywności naukowej o której mowa w art. 16 ust. 2 Ustawy o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.**

Aktywność naukowa dr Tomasza Pawłowskiego obejmuje również inne badania, których wyniki zostały opublikowane w 14 artykułach listy filadelfijskiej (ponumerowane od 20 do 33) z czego 8 artykułów było napisane po doktoracie. Prace te dotyczyły przede wszystkim sektora dynamicznego pełnej LQG, kwazi-lokalnej teorii czarnych dziur oraz nieekspandujących/izolowanych horyzontów (NEH/IH).



Wśród istotnego dorobku po doktoracie dotyczącego wymienionych obszarów należy wskazać pracę 30, w której przedstawiono sformułowanie teorii z ewolucją generowaną przez analog równania Schrödingera z prawdziwym niezależnym od czasu Hamiltonianem, dla której dokładnie znana jest przestrzeń Hilberta oraz działanie Hamiltonianu na stany fizyczne może być obliczone jawnie. Opracowana przez habilitanta metoda pozwala na praktyczne badanie dynamiki LQG na poziomie nieperturbacyjnym. Z kolei w pracy 32 dotyczącej otoczenia czasoprzestrzennego nieekspandujących horyzontów (NEH), habilitantowi we współpracy z J. Lewandowskim udało się rozwinąć radialnie czasoprzestrzeń wokół horyzontu i określić zestaw danych początkowych, koniecznych i wystarczających do określenia metryki w zadanym rzędzie rachunku zaburzeń.

W obszarze aktywności naukowej istotnym elementem dorobku jest też fakt, że dr Tomasz Pawłowski uczestniczył w realizacji 3 projektów badawczych za granicą (FONDECYT-Chile, NSF-USA, Ministerstwo Nauki i Innowacji - Hiszpania) oraz prowadzi wciąż jeden prestiżowy projekt w Polsce. Ten ostatni – Sonata Bis (2013-2019) – jest finansowany przez NCN i polega m.in. na stworzeniu nowego zespołu naukowego przez młodego naukowca.

Istotnym elementem kariery dr T. Pawłowskiego były wieloletnie pobyty zagraniczne jako postdok w kilku różnych ośrodkach naukowych na całym świecie, a przede wszystkim staż w prestiżowym Penn State – miejscu, gdzie narodziła się kwantowa grawitacja pętlowa. Inne miejsca takie jak CSIC w Madrycie, czy też New Brunswick w Kanadzie i Uniwersytet Andres Bello w Chile dały zapewne sporo istotnego doświadczenia naukowego habilitantowi do pracy w Polsce. Z tymi wyjazdami prawdopodobnie związana jest też bardzo aktywna działalność konferencyjna i seminaryjna w postaci 40 referatów wygłoszonych na prestiżowych konferencjach oraz w znakomitych ośrodkach naukowych takich jak: Penn State University, USA; Max-Planck Institute for Gravitational Physics, Golm, Niemcy; University of Nottingham, UK itd. Spośród nich chyba najbardziej prestiżowym było wystąpienie z zaproszonym referatem plenarnym na konferencji „Loops'11” w Madrycie.

Przy tak sporym dorobku publikacyjnym dziwi mnie trochę zupełny brak nawet krajowych nagród za działalność naukową.

W mojej opinii, przedstawione powyżej elementy aktywności naukowej habilitanta świadczą o nabyciu przez Niego zaawansowanej wiedzy i wyspecjalizowanych umiejętności gwarantujących prowadzenie oryginalnych badań naukowych na wysokim poziomie w zakresie kwantowej grawitacji i kwantowej kosmologii.

### **III. Ocena dorobku dydaktycznego, organizacyjnego i popularyzatorskiego.**

Pomimo licznych pobytów naukowych dr T. Pawłowski ma też spory dorobek dydaktyczny i organizacyjny. Prowadził (głównie za granicą) wykłady m.in. z „Metod matematycznych fizyki”, „Mechaniki klasycznej”, „Elektrodynamiki” oraz „Kosmologii” dla studentów Uniwersytetu New Brunswick w Kanadzie, a także Uniwersytetu Andreas Bello w Chile. Również wykładał na szkołach letnich z kosmologii. Ważnym elementem dorobku dydaktycznego była też nieformalna



opieka nad 5 doktorantami, którą prawdopodobnie można zaliczyć jako polską instytucję promotora pomocniczego. O zaangażowaniu habilitanta w te projekty mogą świadczyć chociażby wspólne publikacje z doktorantami. Habilitant brał udział w dwóch komisjach doktorskich oraz napisał jedną recenzję doktoratu w Niemczech.

Na uwagę zasługuje aktywność habilitanta w recenzowaniu publikacji do prestiżowych czasopism z fizyki cząstek i teorii grawitacji takich jak „Physical Review D” oraz „Classical and Quantum Gravity) (razem ponad 50 recenzji przez ok. 10 lat). W przypadku tego ostatniego czasopisma habilitant zasiadał w latach 2012-13 w Komitecie Doradczym Panelu Redakcyjnego (Editorial Board's Advisory Panel). Podobnie w latach 2014-16 był redaktorem pomocniczym (Associate Editor) w czasopiśmie „General Relativity and Gravitation.

Pan dr Tomasz Pawłowski wykazał się również określoną działalnością organizacyjną na rzecz nauki. Trzykrotnie był członkiem komitetu organizacyjnego konferencji naukowych – dwóch organizowanych na Pennsylvania State University i jednej przez Uniwersytet Warszawski. Trzy razy był też organizatorem sesji równoległych lub tematycznych na konferencjach.

Habilitant nie przedstawił żadnej informacji na temat działalności popularyzatorskiej.

#### **IV. Konkluzja**

Osiągnięcie naukowe p. dr Tomasza Pawłowskiego pt. „Dynamika wczesnego wszechświata w pętlowej kosmologii kwantowej” stanowi bardzo istotny wkład w rozwój kosmologii i wraz z pozostałymi osiągnięciami przedstawionymi do oceny zostało zauważone przez środowisko fizyków zajmujących się teorią grawitacji i wczesnym wszechświatem. Stwierdzam, że to osiągnięcie wraz z innymi osiągnięciami naukowymi, w połączeniu z całym dorobkiem dydaktycznym, organizacyjnym i popularyzatorskim spełnia wymogi ustawowe stawiane osobom ubiegającym się o stopień naukowy doktora habilitowanego.

