Dr hab. Przemysław Małkiewicz
Profesor Instytutu
Narodowe Centrum Badań Jądrowych

Warszawa, 20-05-2025

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. Michała Bobuli zatytułowanej
"Effective models of quantum gravitational collapse"

W swojej rozprawie doktorskiej Pan mgr Michał Bobula zawarł wyniki własnych badań, wykonanych pod opieką i we współpracy z promotorem prof. Tomaszem Pawłowskim, dotyczących kwantowych modyfikacji modeli sferycznie symetrycznego procesu zapadania grawitacyjnego oraz formowania się czarnej dziury. Podjęte zagadnienie to temat bardzo istotny w teorii grawitacji, ale także w astronomii i kosmologii, dotyka chyba najbardziej tajemniczej własności teorii Einsteina jaką jest istnienie tzw. osobliwości, gdzie kończą się czas i przestrzeń. Problem osobliwości, pomimo, że znany od początku stosowania teorii Einsteina, pozostaje nierozwiązany i stanowi aktywny obszar badań. Autor wychodzi z założenia, że te osobliwości nie są fizyczne, a kluczem do zrozumienia fizyki tych granicznych obszarów są właśnie efekty kwantowej grawitacji.

Przedłożona rozprawa składa się z 8 rozdziałów: w 3 pierwszych rozdziałach autor wprowadza czytelnika do dziedziny badań: przedstawia motywację i podsumowuje dotychczasowe wyniki, a także wyjaśnia stosowane założenia oraz metody; rozdziały 4, 5, 6 i 7, stanowią 2 własne publikacje (1 współautorska z promotorem i 1 samodzielna) oraz 2 własne preprinty (oba współautorskie z promotorem); rozdział 8 zbiera wszystkie otrzymane przez autora rozprawy wyniki, podsumowuje je i stawia kolejne pytania badawcze.

Rozdziały 1-3 stanowią samodzielny wkład autora w rozprawę. Czytając tę część, odniosłem wrażenie, że mgr Bobula dobrze orientuje się w dziedzinie swoich badań, bo umiejętnie przedstawia najbardziej istotne dla niej elementy wiedzy takie jak model Oppenheimera-Snydera (OS), warunki zszywania czasoprzestrzeni, transformację Bogoliubova i promieniowanie Hawkinga, osobliwości, diagramy Penrose'a, entropię splątania, paradoks informacyjny, krzywą Page'a czy paradygmat Ashtekara-Bojowalda. Wskazuje na ograniczenia semiklasycznych modeli i dyskutuje współczesne podejścia do kwantowania grawitacji. W szczególności, autor bardzo rzeczowo i jasno przedstawia podstawowe założenia, metody oraz najważniejsze sukcesy Pętlowej Grawitacji Kwantowej, na której oparte są badane w dalszych rozdziałach modele. Bardzo rzetelnie wskazuje na wyzwania i nierozwiązane problemy przed jakimi stoi to podejście.

Mimo pozytywnego wrażenia jakie zrobiły na mnie opisane rozdziały, nie są one wolne od pewnych potknięć. Na przykład, już pierwszy wzór (2.1) jest problematyczny, a w jego świetle geometryczna interpretacja T oraz ∂_T wątpliwa. Autor również nie wystrzegł się przynajmniej kilku literówek. Ponadto, w podrozdziale 3.2, autor pisze "Due to the gauge fixing, the diffeomorphism and Gauss constraints are trivially satisfied...", choć to nie wydaje się zupełnie oczywiste, że dodanie dodatkowego warunku (t.j. warunku cechowania) "trywialnie" rozwiązuje warunek poprzedni. Myślę, że ten punkt, i być może

kilka innych, można było nieco bardziej wyjaśnić czytelnikowi lub przynajmniej unikać tego rodzaju sformułowań.

Rozdziały 4, 5 i 6 stanowią prace napisane z promotorem prof. Tomaszem Pawłowskim. Pierwsza praca została opublikowana we wiodącym piśmie Physical Review D w 2023r. Autorzy badają model Oppenheimera-Snydera z modyfikacjami LQC, podejściu efektywnym jak i rainbow gravity (z polem skalarnym), i jest to kontynuacja badań rozpoczętych przez promotora w pracy [29]. Po zszyciu modelu LQC z metryką zewnętrzną autorzy badają diagram Penrose'a (wyk. 2) oraz entropię splątania dla modów w różnych regionach czasoprzestrzeni. Z wykresu 1 widzimy, że efektywna dynamika jak i rainbow gravity dostarczają asymptotycznie tych samych wyników, z pewną różnicą w obszarze silnych poprawek kwantowych. To nie jest zaskakujące i wskazuje na nieostrość takich pojęć jak semiklasyczna czasoprzestrzeń. Zapewne wprowadzenie kolejnego pola (np. fal grawitacyjnych) z innym sprzężeniem skutkowałoby jeszcze inną "semiklasyczną czasoprzestrzenią". Ciekaw jestem czy według autora rozprawy otrzymana w różny sposób "semiklasyczna czasoprzestrzeń" powinna być jakościowo zawsze taka sama. Ciekawym wynikiem pracy jest zachowanie entropii splątania (wykresy 4 i 5) wynikające z istnienia czasopodobnej osobliwości (podobne w obu semiklasycznych obrazach), i jest to wynik nowy.

Kolejne prace, upowszechnione jako preprinty, dotyczą badania struktury przyczynowej czasoprzestrzeni w modelach sferycznie symetrycznych w przypadkach, gdzie możliwa jest jedynie analiza numeryczna. Autorzy rozwijają tu swoją metodę badania struktury przyczynowej i stosują ją kolejno do modelu OS ze stałą kosmologiczną oraz do modelu niejednorodnego. W modelu OS autorzy nie potwierdzili istnienia postulowanych przez niektórych autorów fal uderzeniowych. Metoda pozwoliła autorom na identyfikację osobliwości typu "shell-crossing" z nieskończoną gęstością materii w modelach niejednorodnych, natomiast nie udało się dla tego przypadku potwierdzić istnienia osobliwości czasopodobnej.

Rozdział 7 zasługuje na oddzielny komentarz, ponieważ oparty jest na samodzielnej pracy doktoranta, która została opublikowana we wiodącym piśmie Classical and Quantum Gravity w 2025r. Autor wykorzystuje w niej w sposób twórczy doświadczenie i umiejętności nabyte w pracach wykonanych we współpracy z promotorem, i otrzymuje ciekawy wynik, w którym zamiast odbicia następuje "long squeeze". Praca napisana jest dobrze, klarownie. Fizyczne założenie, na którym cała praca się opiera jest dość oryginalne, zaskakujące, ale i dyskusyjne: semiklasyczny model czarnej dziury rozwiązujący osobliwość i paradoks informacyjny służy do ustanowienia metryki w obszarze zewnętrznym, natomiast warunki zszycia determinują zachowanie wewnętrznej "kuli pyłu". A zatem, odwrotnie do prac poprzednich, autor zakłada, że efekty kwantowe są istotne na zewnątrz, gdzie przyjmują specyficzną postać, a wnętrze jest zdeterminowane warunkami zszycia. A to przecież wewnątrz spodziewamy się najsilniejszych efektów kwantowych i najsilniejszego pola grawitacyjnego. W pierwszej pracy widzieliśmy, że pojęcie semiklasycznej czasoprzestrzeni, na które zszycie będzie czułe, jest nieostre. A więc czerpanie wiedzy o dużej kwantowej modyfikacji wewnętrznej struktury z zachowania asymptotycznego obszaru o małej, zanikającej kwantowej poprawce wydaje się ryzykowne. Nie jest dla mnie jasny status tak otrzymanego modelu, w szczególności jego związek z ewentualnym rozwiązaniem teorii ze "spolimeryzowanym" Hamiltonianem Lemaitre-Tolman-Bondi dla przypadku modelu OS. Mgr Bobula kończy swoją pracę spekulacjami na temat kosmologicznych implikacji otrzymanego modelu.

Podsumowanie pracy doktorskiej mgr. Bobuli znajdziemy w rozdziale 8. Jako najważniejszy kolejny krok uznaje stworzenie dynamicznego modelu z promieniowaniem Hawkinga, co może pomóc w rozwiązaniu problemu osobliwości, który pozostał w badanych modelach. Wydaje się to bardzo słusznym postulatem. Pan mgr Bobula wkazuje również pomysł dalszego badania silnych związków między znalezionym w ostatniej pracy rozwiązaniem kolapsu grawitacyjnego, a formowaniem się struktury wielkoskalowej w kosmologii. Choć ten kierunek wydaje mi się mniej obiecujący, wyjaśnienie postulowanego związku będzie wartościowe, a sam pomysł dowodzi dużego zaangażowania oraz odważnego myślenia autora rozprawy.

Podsumowując, przedmiotowa rozprawa zawiera nowe wyniki opisane w cyklu powiązanych ze sobą tematycznie 4 prac: 2 opublikowanych i 2 upowszechnionych w formie preprintów. Mgr Michał Bobula pokazał w niej, że dobrze orientuje się wybranym przez siebie obszarze badań, potrafi skutecznie korzystać z dostępnych narzędzi teoretycznych oraz w sposób twórczy wykorzystywać je do badania nowych, odważnych hipotez. Wyrażam swoją pozytywną opinię w sprawie spełnienia formalnych i merytorycznych wymogów przez przedstawioną rozprawę i rekomenduję dopuszczenie Pana mgr. Michała Bobuli do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania tytułu doktora nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne.

P. Mazurkiewicz