prof. dr hab. Mariusz P. Dąbrowski
Kierownik - Szczecińska Grupa Kosmologiczna
Instytut Fizyki, Uniwersytet Szczeciński

ul. Wielkopolska 15, 70-451 Szczecin
tel: (+48) 91 4441248; fax: (+48) 91 4441427;
http://cosmo.usz.edu.pl
Mariusz.Dabrowski@usz.edu.pl

Szczecin, 10.06.2025

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ PANA MGR MICHAŁA BOBULI
pt. "Effective models of quantum gravitational collapse"

Jednym z najciekawszych problemów współczesnej teorii grawitacji jest problem kolapsu grawitacyjnego obiektów zwartych i powstawaniu czarnych dziur, które w świetle badań J. Bekensteina i S. Hawkinga są opisane jako obiekty termodynamiczne, w związku z czym mogą wypromieniowywać energię. To w świetle mechaniki kwantowej prowadzi do paradoksu informacyjnego i jest jednym z najtrudniejszych i wciąż w pełni nierozwiązanych zagadnień fizyki. Poza tym jawnie wiąże się z problemem kwantowania grawitacji Einsteina, czyli dopełnienia ostatniego ogniwa w pełnej unifikacji wszystkich oddziaływań fundamentalnych.

W ten nurt badań wpisuje się rozprawa doktorska mgr Michała Bobuli. Za pomocą jednego z podejść do kwantowania grawitacji – kwantowej grawitacji pętlowej – próbuje ona rozważać scenariusze kolapsu grawitacyjnego kuli pyłu z pewnymi dodatkowymi założeniami natury fizycznej. Ma to na celu uniknięcie osobliwości w czasoprzestrzeni jak również rozwiązanie paradoksu informacyjnego dla promieniujących czarnych dziur.

Rozprawa powstała na bazie dwóch opublikowanych prac w czasopismach o wysokim parametrze wpływu takich jak Physical Review D oraz Classical and Quantum Gravity oraz dwóch jeszcze nieopublikowanych, chociaż wysłanych do publikacji, artykułach, które ukazały się na archiwach elektronicznych. Publikacje są nowe (2023-25) i stąd jeszcze dosyć słabo cytowane – liczba cytowań (bez autocytowań) wynosi 20. Indeks Hirscha dla całego dorobku to h=2. Najlepiej cytowaną jest praca o kolapsie Oppenheimera-Snydera w scenariuszu grawitacji tęczowej (Phys.Rev.D 108 (2023) 2, 026016).

Rozprawa składa się ze 104 stron a jej struktura nie jest typową pracą pisemną, lecz ma charakter „hybrydowy" – jest to mieszanka tekstów napisanych specjalnie oraz załączonych i jakoby

„wplecionych" w narrację pracy oryginalnych artykułów. I tak na początku mamy 3 rozdziały wprowadzające (28 stron) napisane specjalnie, potem 4 rozdziały składające się każdy z krótkiego maksimum 1-stronicowego wprowadzenia i przekopiowanego artykułu z czasopisma (64 strony) oraz rozdziału podsumowującego i literatury (101 pozycji).

Rozdziały 2 i 3 mają charakter wprowadzający do tematu i jednocześnie pokazują kompetencje i rozumienie tych zagadnień przez kandydata, bowiem są napisane rzetelnie i poglądowo.

I tak w rozdziale 2 omówione są wszystkie podstawowe aspekty zjawiska kolapsu grawitacyjnego pyłowej kuli materii do postaci czarnej dziury a następnie efekt parowania tego obiektu. Kolaps opisany jest według scenariusza Oppenheimera-Snydera (OS). Proces promieniowania Hawkinga prowadzi do paradoksu informacyjnego (kwantowy stan czysty przechodzi w stan mieszany). Temu tematowi, a także próbom jego rozwiązania, np. poprzez podejście Page'a (krzywa Page'a), poświęcona jest kolejna część rozdziału. Autor poświęca więcej czasu podejściu Ashtekara-Bojowalda, w którym nie powstaje osobliwość pomimo emisji promieniowania Hawkinga, co wydaje się rozwiązywać paradoks informacyjny. Wadą tego podejścia jest niejasna natura fizyczna procesów bliskich skali Plancka. Ostatni podrozdział 2.5 koncentruje się na omówieniu głównych podejść do kwantowej grawitacji. Autor wymienia tylko 3 z nich: teorię strun, asymptotyczną grawitację i kwantową grawitację pętlową (loop quantum gravity – LQG), mówiąc iż cała reszta pracy będzie dotyczyła tego ostatniego podejścia.

W związku z powyższym, w rozdziale 3, Autor wprowadza główne idee kwantowej grawitacji pętlowej LQG. Jedną z jej istotnych cech jest dynamiczne wprowadzenie geometrii poprzez stany kwantowe (pętle Wilsona), czego nie ma np. w teorii strun, które bazują na ustalonej metryce tła. Oczywiście podejście LQC jest podejściem kanonicznym – podobnie jak podejście Wheelera-DeWitta (WdW). Kluczem jest tutaj działanie ADM (Arnovitt-Deser-Misner) wraz ze zmiennymi Ashtekara skomponowanymi z triad, koneksji spinu oraz zewnętrznej krzywizny.

Główne i nowatorskie rozdziały pracy to rozdziały 4, 5, 6 i 7, będące w istocie kopiami opublikowanych lub wysłanych do publikacji artykułów. W nich Autor rozwija modele kolapsu czarnych dziur oparte na LQG i rozważa ich implikacje dla rozwiązania paradoksu informacyjnego.

Celem rozdziału 4 jest rozważenie klasycznego kolapsu OS w formalizmie LQG. Rozważany jest tu tradycyjny kolaps materii pyłowej (kuli) a także kolaps z zaburzeniem pola skalarnego rozważanego w ramach tzw. grawitacji tęczowej (rainbow gravity), gdzie mamy do czynienia ze zmodyfikowanym związku dyspersyjnym w którym pojawiają się funkcje jawnie zależne od energii cząstek. W efekcie, kolaps grawitacyjny kuli pyłu zatrzymuje się, a sama kula tuneluje do innego asymptotycznie płaskiego Wszechświata i ekspanduje. Innymi słowy, zachodzi przejście od stanu czarnej dziury do stanu białej dziury, ale w innym asymptotycznie płaskim Wszechświecie. Rozwiązanie zewnętrzne z kolei dopuszcza czasopodobną osobliwość, tak jak w klasycznych rozwiązaniach typu Reissnera-Nordströma (RN).

W rozważaniach rozdziału 4 pojawiają się też obliczenia entropii splątania produkowanej przez bezmasowe pole skalarne w asymptotycznie płaskich regionach czasoprzestrzeni jako przyczynku do rozwiązania paradoksu informacyjnego. W istocie rzeczy pojawiają się tutaj 3 regiony z geodezyjnie zupełnymi trajektoriami dla fotonów: półklasyczny region w przeszłości

(czarna dziura), region kwantowy wokół osobliwości czasopodobnej i półklasyczny region w przyszłości (biała dziura). W tym pierszym entropia splątania rośnie od zera do nieskończoności, w drugim rośnie od minus nieskończoności do pewnej skończonej wartości (maksimum) a następnie maleje do minus nieskończoności, w trzecim rośnie od minus nieskończoności do pewnej skończonej wartości. Niestety, pojawienie się nieskończonych wartości entropii jest interpretowane jako zapobiegające rozwiązaniu problemu informacyjnego. Wciąż mamy do czynienia z osobliwością i to podobną do osobliwości typu RN, która dodatkowo jest niestabilna.

Nowymi osiągnięciami opisanymi w rozdziale 5 są: rozszerzenie dyskusji rozdziału 4 na przypadek obecności w równaniach LQG stałej kosmologicznej Λ oraz przedstawienie nowej numerycznej metody otrzymywania diagramów Penrose'a użytecznych do badania struktury przyczynowej czasoprzestrzeni. Rozdział oparty jest o e-print 2410.22605. Rozważane są obie metryki: wewnętrzna i zewnętrzna, połączone odpowiednimi warunkami zszycia. Jakościowo, rozwiązania z Λ nie różnią się zbytnio od tych bez stałej – wciąż pojawia się czasopodobna osobliwość (teraz typu RN-deSitter) oraz przejście typu czarna dziura – biała dziura.

Jeśli chodzi o strukturę przyczynową, to cechą charakterystyczną jest tutaj pojawienie się 3 typów horyzontów zamiast 2 jak w przypadku modeli bez Λ. Ich ogólny wygląd jest nieco inny niż w standardowym podejściu (patrz np. rys. 2 w pracy PRD 108, 026016 (2023) w rozdziale 4), w którym są to „trójkąty" ograniczone pionową linią (jak dla czasoprzestrzeni Minkowskiego) – tutaj są to krzywe linie $r = 0$ i $r = r_b$. W każdym razie, osobiście doceniam zastosowanie konforemnych diagramów Penrose'a bardziej niż jakiejkolwiek innej metody czysto analitycznej. Oczywiście, ogólnie najtrudniej jest otrzymać diagramy zanurzenia, bowiem do tego są potrzebne dodatkowe wymiary przestrzeni zanurzającej.

Kolejny rozdział 6 – oparty o e-print 2410.22943 – rozciąga rozważania dotyczące kolapsu kuli pyłu na przypadek kuli składającej się z powłok o niejednorodnej gęstości opisywanej metryką Lemaître'a-Tolmana-Bondiego (LTB). Kontrowersyjne i niewyjaśnione tutaj jest pojawienie się podobnie jak w jednorodnych modelach czasopodobnej osobliwości. Poza tym, jeśli odrzucimy możliwość pojawiania się osobliwości przecinających się sfer o różnej gęstości masy (shell-crossing singularity), to pozostanie nam niewiele regionów czasoprzestrzeni do zagospodarowania do celów analizy problemu paradoksu informacyjnego. Ogólnie, osobliwości typu shell-crossing są problemem dla modeli LTB i najprostszym rozwiązaniem jest ich usunięcie, ale czy jest to fizycznie uzasadnione, to osobna kwestia.

Ostatni rozdział 7 oparty jest na opublikowanej pracy (CQG 42, 065027 (2025)) i poświęcony jest idei polegającej na zastosowaniu inflacji kosmologicznej (czyli efektywnego ujemnego ciśnienia) w celu zapobieżenia całkowitemu kolapsowi wewnętrznej kuli pyłu w scenariuszu OS. To przekłada się na nieosobliwe zachowanie się zewnętrznej metryki przybierającej postać Haywarda. Jej istotą jest pojawienie się granicznej wartości współrzędnej radialnej X o wartości mogącej być blisko skali Plancka (choć niekoniecznie) dającej tzw. pozostałość (remnant) z kolapsu czarnej dziury.

Moje uwagi krytyczne oraz pytania odnoszą się do następujących kwestii:

- Autor w sekcji 2.5 pomija rolę jaką odegrało podejście kanoniczne Wheelera-deWitta do kwantowej grwitacji. Rozumiem, iż jest ono powiązane z LQG, ale wciąż stanowi klasyczny element w rozważaniach na temat kwantowej grawitacji;
- Czy pojawienie się czasopodobnej osobliwości we wszystkich rozważanych modelach jest cechą podejścia LQC czy też ma związek z jakimś innym fizycznym problemem?
- W modelach LTB kolaps może zachodzić dla różnych punktów przestrzeni w różnych chwilach czasu. Czy to wpływa na specyfikę wciąż powstającej czasopodobnej osobliwości?
- W modelach LQC (praca PRD 108, 026016 (2023)) z jednej strony entropia splątania wskazuje na efekty kwantowe (quantumness), a z drugiej strony jej wartości nie pozwalają na rozwiązanie paradoksu informacyjnego. Czy nie ma tu sprzeczności?
- Jak powyżej. Czy nie da się entropi splątania zregularyzować tak aby dopasować ją do krzywej Page'a?
- Wolę użycie słowa „inhomogeneous" zamiast „nonhomogeneous", ale może Autor mnie przekona, iż słowo „nonhomogeneous" jest tutaj lepsze!? Dlaczego? Czy są one równoważne?

Komentarz: można rozważyć kolaps OS dla modelu niejednorodnego ciśnienia, który jest komplementarny do LTB (znany jest pod nazwą modelu Stephaniego). Zajmowałem się takimi modelami m.in. w pracach Journ. Math. Phys. 34, (1993), 1447 i Phys. Rev.D 71 (2005), 103505. Ciekawostką byłaby odpowiedź na pytanie, czy pojawi się tutaj osobliwość czasopodobna?

Reasumując, najważniejsze wyniki rozprawy dające nowe spojrzenie na problem kolapsu grawitacyjnego kuli pyłu to:

1) uzyskanie rozwiązań wewnętrznych, w których ewolucja pyłu ma punkt zwrotny (wielkie odbicie zamiast wielkiego krachu – kolapsu), chociaż nieco „zepsute" pojawieniem się czasopodobnych osobliwości w rozwiązaniu zewnętrznym;
2) przedstawienie nowej numerycznej metody uzyskiwania diagramów Penrose'a;
3) uzyskanie nieosobliwego rozwiązania zewnętrznego Haywarda przy zastosowaniu ewolucji de-Sittera (inflacji) w rozwiązaniu wewnętrznym;
4) rozważenie niejednorodnego kolapsu kuli pyłu (ze sferami o niejednorodnej gęstości masy) w scenariuszu OS w formalizmie LQG, chociaż z problematycznym pojawieniem się osobliwości czasopodobnych i niezerowym zbiorem obszarów czasoprzestrzeni z osobliwościami „przecinających" się sfer.

Konkludując uważam, iż rozprawa doktorska mgr Michała Bobuli stanowi wystarczająco nowatorski wkład do zagadnień z obszaru kwantowego podejścia do zagadnienia kolapsu grawitacyjnego materii pyłowej. Stwierdzam, że **spełnia ona z nawiązką wymogi ustawowe (art. 187 ust. 1, 2 i 3 ustawy „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce" z dn. 20 lipca 2018) stawiane osobom ubiegającym się o stopień naukowy doktora**. W związku z tym rekomenduję rozprawę p. mgr Michała Bobuli do publicznej obrony.