

Kraków, 30 października 2022 r.

dr hab. Sebastian Szybka, prof. UJ
Zakład Astrofizyki Relatywistycznej i Kosmologii
Obserwatorium Astronomiczne
Uniwersytet Jagielloński

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Denisa Dobkowskiego-Ryłko
„Isolated horizons in spacetimes with cosmological constant”**

Praca doktorska Pana Denisa Dobkowskiego-Ryłko została napisana pod opieką prof. dr hab. Jerzego Lewandowskiego. Temat badawczy, którego podjął się autor, związany jest z czarnymi dziurami oraz falami grawitacyjnymi. Rozpatrywane są czasoprzestrzenie z niezerową stałą kosmologiczną. Autor zastosował podejście kwazilokalne oparte na analizie geometrycznych właściwości zerowych hiperpowierzchni zwanych izolowanymi horyzontami (horyzont zdarzeń czarnej dziury to szczególny przypadek takiej hiperpowierzchni). Chociaż badania izolowanych horyzontów trwają już kilkadziesiąt lat, to wiele problemów ich dotyczących pozostaje nadal nierozwiązanych. Celem pracy jest scharakteryzowanie tych hiperpowierzchni w czasoprzestrzeniach z niezerową stałą kosmologiczną (głównie w odniesieniu do czarnych dziur) oraz ich „praktyczne” zastosowanie — autor wykorzystuje horyzont kosmologiczny w zaburzonej czasoprzestrzeni de Sittera (szczególny przypadek horyzontu izolowanego) do wyprowadzenia wzoru kwadrupolowego. Wzór ten określa energię promieniowania grawitacyjnego wyemitowanego przez zwarte źródło i stanowi uogólnienie wzoru kwadrupolowego Einsteina na przypadek dodatniej stałej kosmologicznej.

Wyniki zaprezentowane w rozprawie zostały opublikowane w postaci pięciu artykułów. Wszystkie prace mgr Dobkowski-Ryłko napisał wspólnie z promotorem, a cztery z nich powstały w ramach szerszej współpracy w tym również międzynarodowej.

Rozprawa (w języku angielskim) składa się ze wstępu, pięciu rozdziałów zawierających główne wyniki, podsumowania, dwóch apendyksów oraz spisu literatury. Wstęp zawiera zwięzłe sformułowanie problemu, prezentację motywacji, krótkie wprowadzenie historyczne oraz inne użyteczne informacje takie jak: najważniejsze wyniki, wkład autora, opis konwencji i notacji.

W rozdziale pierwszym przedstawiono możliwe typy izolowanych horyzontów w klasyfikacji Petrova. Wyprowadzono również równanie, które charakteryzuje najciekawszy w kontekście czarnych dziur typ D. Równanie to przedstawiono w kilku równoważnych formach i wykazano jego związek z tzw. równaniem „near horizon geometry”. W rozdziale drugim przedstawiono ogólne rozwiązanie równania na horyzont izolowany typu D o topologii $S_2 \times \mathbb{R}$ przy założeniu symetrii osiowej. Rozwiązanie to okazało się zależeć od dwóch parametrów (pomijając wartość stałej kosmologicznej), które można powiązać z powierzchnią i krętem. Samo rozwiązanie odpowiada zewnętrznym lub wewnętrznym horyzontom niekestremalnego rozwiązania Schwarzschilda/Kerra-(anty) de Sittera lub horyzontowi „near horizon geometry” w granicy Horowitza-Bardeena dla ekstremalnych odpowiedników wspomnianych rozwiązań czarnodziurowych. Zależność lokalnych rozwiązań od dwóch parametrów (powierzchni przestrzennego cięcia horyzontu i krętu) można zinterpretować jako lokalną wersję twierdzenia o braku włosów. Rozdział trzeci dotyczy równania na horyzont izolowany typu D o cięciach przestrzennych o genusie większym niż zero. Pan Dobkowski-Ryłko przedstawił w nim interesujący argument za tym, że wszystkie rotujące stacjonarne czarne dziury w czterech wymiarach muszą mieć przestrzenne cięcia horyzontu o topologii S_2 . W rozdziale czwartym równanie na horyzont izolowany typu D rozpatrywane jest w przypadku nietrywialnej wiązki $U(1)$. Przeprowadzono klasyfikację takich rozwiązań. W przypadku bez rotacji horyzont izolowany odpowiada horyzontowi w czasoprzestrzeni Tauba-NUT-(anty) de Sittera. W przypadku z rotacją nie ma odpowiedniości z czasoprzestrzenią Kerra-NUT-(anty) de Sittera. Piąty rozdział wyróżnia się tematycznie spośród czterech poprzednich. Pan Dobkowski-Ryłko wyprowadza w czasoprzestrzeni z dodatnią stałą kosmologiczną odpowiednik wzoru kwadrupolowego Einsteina. Zaproponowane podejście wykorzystuje horyzont kosmologiczny jako charakterystyczną zerową powierzchnię przez którą mierzony jest strumień promieniowania grawitacyjnego (ten pomysł zaczerpnięty został z prac Abhaya Ashtekara i jego współpracowników). Horyzont kosmologiczny w rozważanej czasoprzestrzeni to przypadek szczególny horyzontu izolowanego. Rozdział ten stanowi przykład praktycznego zastosowania pojęcia horyzontu izolowanego badanego w czterech poprzednich rozdziałach.

Praca doktorska Pana Denisa Dobkowskiego-Ryłko napisana jest w sposób przejrzysty. Pozytywnego wrażenia nie zmieniają nieliczne literówki (np. „principle null direction” w tytule podrozdziału 1.3.3, „danse subset” na stronie 30, „Chandrashekar” na stronie 80, niedomknięty nawias na dole strony 87, czy też „o f”, „kerr”, „einstein”, „newman”, ... na stronach 101, 102, 103), uchybienia typograficzne („sierotka” na stronie 83) oraz drobne usterki merytoryczne.

We wstępie rozprawy doktorskiej autor wspomina o obserwacjach przesunięć ku czerwieni przeprowadzonych przez Hubble’a w roku 1929. Takie sformułowanie jest nieprecyzyjne. Hubble oszacował odległości do galaktyk (myląc się zresztą o czynnik rzędu 10), których przesunięcia ku czerwieni (większości z nich) wyznaczył w roku 1917 Vesto Slipher. W ten sposób powstał słynny wykres zależności prędkości ucieczki galaktyk (zadanej przez przesunięciu ku czerwieni) od odległości. Na usprawiedliwienie autora rozprawy należy dodać, że Hubble nie zacytował Sliphera w swojej pracy z roku 1929 pomimo, iż za zgodą Sliphera skorzystał z jego obserwacji. Dopiero artykuł Hubble’a i Humasona z roku 1931, w którym zawarto bardziej precyzyjną wersję słynnego wykresu, zawiera należne podziękowania dla Vesto Sliphera.

Do dwóch wzorów wkradły się błędy. Mają one charakter literówek, które, jak przypuszczam, pojawiły się podczas spisywania wyników i nie wpłynęły na poprawność dalszych obliczeń. We wzorze (2.89) brakuje stałej kosmologicznej. We wzorze (4.36) zgubiono w ostatnim członie r^4 .

Moim zdaniem jednym z ciekawszych rezultatów zaprezentowanych w pracy jest uogólniony wzór kwadrupolowy Einsteina. Niestety w rozprawie nie przeprowadzono dyskusji otrzymanego wyniku. Jak zinterpretować fizycznie człony liniowe w stałej Hubble’a (człony, które odróżniają zaproponowany wzór od wzoru kwadrupolowego Einsteina)? Czy nie trywializują się one dla źródeł periodycznych skoro mają postać iloczynu drugich i trzecich pochodnych ze składowych zredukowanego tensora momentu kwadrupolowego? Wyprowadzony wzór nie został skonfrontowany z propozycjami innych autorów dotyczących czasoprzestrzeni z dodatnią stałą kosmologiczną. Czy jest on sensowny fizycznie?

Pan Denis Dobkowski-Ryłko biegle posługuje się zaawansowanym formalizmem matematycznym. Jego rozprawa doktorska dowodzi, iż posiada on szeroką wiedzę z zakresu fizyki teoretycznej, a w szczególności, z zakresu ogólnej teorii względności Einsteina. Moim zdaniem magister Dobkowski-Ryłko posiadał umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej i zaprezentował oryginalne rozwiązania istotnych problemów naukowych.

Podsumowując, rozprawa doktorska mgr Denisa Dobkowskiego-Ryłko spełnia ustawowe, formalne i zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim z dziedziny fizyki teoretycznej. **Wnoszę o dopuszczenie mgr Dobkowskiego-Ryłko do dalszych etapów przewodu doktorskiego, w tym do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.** Co więcej, wnioskuję o **wyróżnienie** omawianej pracy doktorskiej. Obserwacje astronomiczne wskazują na dodatnią wartość stałej kosmologicznej. Od roku 2015 potrafimy obserwować wszechświat za pośrednictwem fal grawitacyjnych. Od kilku lat potrafimy również obserwować horyzonty czarnych dziur (jako

obiekty rozciągłe). Pomimo to, wiele zagadnień pozostaje nadal niezrozumianych od strony teoretycznej. Promieniowanie grawitacyjne w czasoprzestrzeniach z niezerową stałą kosmologiczną, jego właściwości i unoszona przez fale grawitacyjne energia wciąż czekają na precyzyjny opis w ramach teorii grawitacji Einsteina. Sytuacja jest więc niezwykle — po wielu latach od odkrycia ogólnej teorii względności obserwacje zaczęły odgrywać bardzo istotną rolę, a teoria musi nadrabiać braki. W rozprawie doktorskiej Pan Dobkowski-Ryłko uzyskał szereg wyników, które w sposób istotny uzupełniają naszą wiedzę teoretyczną (np. propozycja uogólnienia wzoru kwadrupolowego Einsteina). Uzupełniają one lukę powstałą przez te lata, gdy wątpiono w realność niezerowej stałej kosmologicznej ignorując jej rolę w matematycznych dowodach. To ciekawy przykład badań, w których zaawansowany formalizm matematyczny zastosowany w ramach potwierdzonej teorii fizycznej dotyka problemów powstałych w wyniku analizy danych obserwacyjnych (realność stałej kosmologicznej i fal grawitacyjnych).



dr hab. Sebastian Szybka, prof. UJ