

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Anny Sochy pod tytułem
„Role of gravitational interactions during reheating and dark matter production”

Przedstawiona do recenzji praca doktorska, przygotowana pod kierunkiem Prof. dr hab. Bohdana Grzadkowskiego składa się z siedmiu rozdziałów, czterech dodatków o charakterze technicznym i spisu bibliografii, który zawiera 454 pozycje. Praca napisana została w języku angielskim; zredagowana jest starannie zarówno pod względem tekstu jak i jakości graficznej zamieszczonych wykresów.

Tematyka rozprawy dotyczy zagadnienia występowania ciemnej materii we wszechświecie, przyjmując że powstała ona po etapie inflacji kosmologicznej w trakcie epoki generacji materii i jej termalizacji – tzw. epoki “podgrzania” (z ang. “reheating”). Główny wątek tej dysertacji to badanie scenariuszy produkcji ciemnej materii na tym etapie ewolucji wszechświata, i badanie jej zależności od przebiegu procesu podgrzania. Część przedstawionych w pracy rozważań dotyczy samego tego procesu, a uzyskane wyniki są następnie zastosowane do badania charakterystyk ciemnej materii w oparciu o założenie, że ciemna materia składa się przede wszystkim z masywnych cząstek wektorowych które sprzęgają się do stopni swobody Modelu Standardowego wyłącznie grawitacyjnie. Autorka podkreśla, że zagadnienie ciemnej materii jest w kluczowy sposób związane z wyjściem wszechświata z epoki inflacji i związaną z tym produkcją materii.

Epoka podgrzania jest przedmiotem badań od dawna, ale wiele pytań nadal pozostaje bez odpowiedzi – w szczególności dlatego, że zależą one od szczegółów stopni swobody wychodzących poza Model Standardowy. Jest to jednocześnie szalenie ważny etap ewolucji Wszechświata, odpowiedzialny w istocie za jego obserwowany obecnie kształt. Często przyjmuje się, że proces podgrzania przebiega bardzo szybko (“natychmiastowo”). Recenzowana praca rozważa sytuację, gdy termalizacja nie jest szybka, a obecność ciemnej materii we Wszechświecie w znacznej mierze odzwierciedla jej przebieg. Poza badaniem

takich scenariuszy kosmologicznych, praca przedstawia wyniki dotyczące obserwacyjnego rozpoznania śladów tej epoki poprzez badanie fal grawitacyjnych. Tematyka ta jest aktualna, ważna, i aktywnie rozwijana w wielu ośrodkach na całym świecie.

Pierwsze trzy rozdziały mają charakter przeglądowy: zawierają wprowadzenie w tematykę pracy (Rozdział 1), omówienie podstaw standardowego modelu kosmologicznego (Rozdział 2), i zarys teorii inflacji, który zawiera też podsumowanie głównych cech klasy modeli inflacji określanych jako “alpha-attractor T model”, która stosowana jest w dalszej części pracy. Modele te, mimo egzotycznej nazwy, są obecnie bardzo popularne i są zgodne z danymi obserwacyjnymi przy odpowiednim doborze parametrów. Te trzy rozdziały przeglądowe są obszerne, ale chciałbym podkreślić, że są świetnie napisane i zdradzają autentyczne zainteresowanie dla poruszanej tematyki.

Rozdziały 4, 5, i 6 zawierają już oryginalne wyniki Autorki doktoratu. Rozdział 4 przedstawia systematyczny opis perturbacyjnych mechanizmów przekazu energii zmagazynowanej w polu inflatonu do stopni swobody Modelu Standardowego, zakładając szereg najbardziej naturalnych scenariuszy sprzężenia między tymi sektorami. Przedstawione są tu (uśrednione po czasie) równania Boltzmanna i pewne ich rozwiązania w szczególnych przypadkach. Autorka pokazuje, że zależność szerokości rozpadu od czasu prowadzi do procesów podgrzania które nie są natychmiastowe. Rozdział ten rozważa dalej szereg możliwych scenariuszy w zależności od założeń odnośnie charakteru sprzężenia między inflatonem a sektorem Modelu Standardowego: czy występują bezpośrednie sprzężenia inflatonu do pól Modelu Standardowego, czy sprzężenie to zachodzi wyłącznie za pośrednictwem pola grawitacyjnego. Jedną z omawianych opcji to bezpośrednie sprzężenie inflatonu dubletem Higgsa. W ostatniej części tego rozdziału Autorka przedstawia ograniczenia obserwacyjne dla różnych wariantów sprzężeń i różnych wartości parametrów określającego energię potencjalną w rozważanej klasie modeli inflacji.

Rozdział 5 przedstawia wyniki badań dotyczących konsekwencji różnych scenariuszy podgrzania dla propagacji pierwotnych fal grawitacyjnych powstających powstających w epoce inflacji, w szczególności w sytuacjach gdzie podgrzanie nie jest natychmiastowe. W części wstępnej tego rozdziału Autorka przypomina w szczegółowy i czytelny sposób linearyzację równań Einsteina wokół tła FRW z uwzględnieniem źródeł, a następnie śledzi propagację fal grawitacyjnych podczas kolejnych epok ewolucji wszechświata ze szczególnym uwzględnieniem fazy podgrzania i wyprowadza wzór na ich

wkład do gęstości energii w obecnej epoce. Występuje tu oczywiście zależność zarówno od parametrów charakteryzujących model inflacyjnego tła, jak i od schematu podgrzania, a w szczególności od sprzężeń inflatonu do stopni swobody Modelu Standardowego. Umożliwia to przeprowadzenie analizy wyników pod kątem uzyskania ograniczeń obserwacyjnych na występujące tu parametry, co Autorka czyni w dwóch sekcjach tego rozdziału.

Rozdział 6 omawia model ciemnej materii który zakłada, że składa się ona ze stabilnych cząstek wektorowych o niezerowej masie, przyjmując że sprzęgają się one do stopni swobody Modelu Standardowego wyłącznie grawitacyjnie. Autorka rozważa trzy możliwe scenariusze generacji ciemnej materii poprzez sprzężenie z grawitacją: nie-adiabatyczną ewolucję materii podczas ekspansji, a także termalną lub nie-termalną produkcję w ramach rachunku zaburzeń poprzez wymianę grawitonu. Na wstępie Autorka szczegółowo omawia opis pola wektorowego w tle grawitacyjnym i możliwe sprzężenia tych pól, w szczególności sprzężenia wychodzące poza minimalny schemat rozważany w jej rozprawie. Następnie Autorka przedstawia klasyczną ewolucję masywnych pól wektorowych w grawitacyjnym tle modelu FRW i ich opis kwantowy. W kolejnych sekcjach przedstawiona jest ewolucja podłużnych modów pola wektorowego w trakcie inflacji i po jej zakończeniu. Następnie Autorka bada czysto grawitacyjną produkcję ciemnej materii, omawiając szczegółowo gęstość energii wektorowej ciemnej materii w zależności od masy, pokazując że dominujący wkład pochodzi od modów podłużnych. Sekcję tę kończy obliczenie wkładu ciemnej materii do obecnej gęstości energii wszechświata w ramach rozważanego scenariusza. Przedostatnia sekcja tego rozdziału przedstawia analizę produkcji ciemnej materii perturbacyjnie, poprzez wymianę grawitonu, a ostatnia zawiera podsumowanie uwzględniające wszystkie rozważane w tym rozdziale mechanizmy.

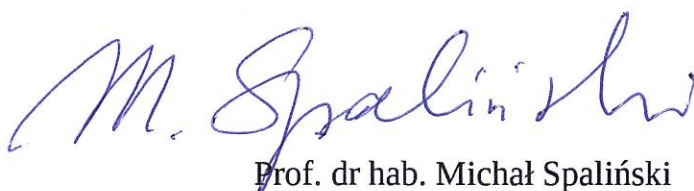
Rozdział 7 to krótkie omówienie całości pracy z uwypukleniem logiki przyjętego podejścia i jego prezentacji. Pracę zamykają cztery dodatki, zawierające szereg wyników o charakterze technicznym, które wykorzystywane są w głównej części pracy.

Oryginalne wyniki przedstawione w pracy doktorskiej mgr Anny Sochy opublikowane zostały w czterech artykułach, z których trzy ukazały się już w bardzo dobrych czasopismach naukowych. Są też tematem dwóch opublikowanych artykułów konferencyjnych. Pozycje te są dobrze cytowane, średnio ponad 20 razy. Uważam, że to jest bardzo dobry wynik dla osoby na tym etapie kariery naukowej.

Omawiana rozprawa doktorska prezentuje szereg wartościowych i oryginalnych rezultatów, a napisana jest w ciekawy i żywy sposób. Zawiera wiele szczegółów technicznych i uwag dotyczących znaczenia i interpretacji wyników, dzięki czemu może być bardzo pożytecznym wprowadzeniem w tę złożoną tematykę. Praca zawiera drobne błędy edytorskie, ale jest ich niewiele biorąc pod uwagę że jest to tekst bardzo obszerny. Od strony merytorycznej nie mam zastrzeżeń, choć chętnie bym widział jakieś refleksje i uwagi dotyczące szerszego kontekstu i możliwości uogólnienia przedstawianych rozważań – przykładem mogą być modele z kilkoma polami skalarnymi w sektorze inflatonu. Inne pytanie tego rodzaju to kwestia efektów lepkości, które w ogólności modyfikują propagacje fal grawitacyjnych (i samo tło): naturalne więc jest zapytać, na ile takie efekty mogą wpłynąć na opisane w pracy scenariusze. Powyższe uwagi mają jednak charakter marginesowy i nie wpływają na moją bardzo wysoką ocenę tej dysertacji.

Podsumowanie

Po zapoznaniu się z przedstawioną do recenzji rozprawą doktorską mgr Anny Sochy stwierdzam, że spełnia ona ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane pracom doktorskim, a dorobek naukowy Autorki rozprawy jest bardzo dobry. W tych okolicznościach wnoszę o dopuszczenie mgr Anny Sochy do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Prof. dr hab. Michał Spaliński