

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

Celem rozprawy doktorskiej mgr. Anny Sochy, wykonanej na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem prof. dr. hab. Bohdana Grzadkowskiego jest zaprezentowanie i przeanalizowanie modeli ciemnej materii, w których przyjmuje się, że zbudowana jest ona z jedynie grawitacyjnie oddziałujących cząstek wektorowych.

Recenzowana rozprawa doktorska liczy 229 stron i składa się z 6 rozdziałów, podsumowania, krótkiego zestawienia danych obserwacyjnych i 3 dodatków prezentujących szczegóły techniczne pominięte w tekście zasadniczym oraz liczącej 454 pozycje bibliografii.

Wstępny Rozdział 1 rozprawy doktorskiej mgr A. Sochy rozpoczyna się od krótkiego zaprezentowania historii problemu czarnej materii i potwierdzających jej istnienie współczesnych obserwacji i pomiarów. Następnie Autorka dokonuje skrótego przeglądu najważniejszych współczesnych koncepcji teoretycznych mających na celu opis ciemnej materii, będących alternatywnymi w stosunku do modeli teorio-cząstkowych. Rozdział ten kończy się dwoma podrozdziałami prezentującymi argumenty świadczące na korzyść rozważanych modeli czarnej materii w postaci grawitacyjnie oddziałujących cząstek wektorowych. Ten wstępny rozdział jest bardzo dobrze napisany i stanowi świetny wstęp do rozprawy.

Rozdział 2 rozprawy doktorskiej mgr A. Sochy poświęcony jest skrótemu przedstawieniu najważniejszych elementów standardowego modelu gorącego wczesnego wszechświata oraz argumentów leżących u podstaw scenariusza inflacyjnego. Zawiera on treści podręcznikowe, ale zwraca uwagę, że jest bardzo dobrze napisany i streszcza wszystkie podstawowe informacje dotyczące współczesnych modeli kosmologicznych.

Prezentacji modeli inflacji kosmologicznej poświęcony jest Rozdział 3 rozprawy doktorskiej. Po krótkim opisanie modelu jedno-inflatonowego, Autorka przechodzi następnie do rozważań dotyczących oscylacyjnej fazy kończącej epokę inflacyjną, bada warunki ograniczające modele inflacyjne wynikające z obserwowanego widma podczerwonego promieniowania relikтового, by następnie w skrócie opisać panoramę rozważanych modeli inflacyjnych. Warto podkreślić, że część tego rozdziału opisuje oryginalne wyniki mgr A. Sochy.

Kolejny rozdział rozprawy doktorskiej mgr A. Sochy napisane są w oparciu o oryginalne wyniki uzyskane przez Autorkę.

I tak Rozdział 4 poświęcony jest – kluczowemu w omawianym w rozprawie doktorskiej programie badawczym - procesowi dogrzewania (reheating). Jest to proces, w którym, po zakończeniu fazy inflacyjnej produkowane są wszystkie cząstki obecne we współczesnym wszechświecie, w tym – w większości scenariuszy - również ciemna materia (alternatywny scenariusz powstania ciemnej materii jest opisany w Rozdziale 5). Rozdział ten zaczyna się od skrótowej prezentacji mechanizmu produkcji cząstek przez oscylujące pole inflatonu. Rozważono przy tym dwa modele: produkcji bezpośredniej (w pierwszym rzędzie rachunku zaburzeń), odpowiadającej produkcji cząstek bezpośrednio oddziałujących z oscylującym polem inflatonu oraz pośredniej (w drugim rzędzie), poprzez oddziaływania grawitacyjne. Następnie Autorka śledzi ewolucję powstałych cząstek wykorzystując w tym celu równanie Boltzmanna i analizuje warunki, jakie muszą być spełnione by dogrzewanie mogło odtworzyć warunki obserwowane we współczesnym wszechświecie. Szczegółowo rozważany jest model, w którym pole inflatonu sprzęga się do pola Higgsa. Mam pewną wątpliwość odnośnie do tego modelu, związaną z faktem, że w swoim opisie Autorka zaznacza, że „skale energii inflacji i dogrzewania są zazwyczaj znacznie wyższe niż skala elektroslaba”, jednocześnie zupełnie zaniedbując termiczne poprawki do potencjału Higgsa. Wydaje mi się, że zagadnienie wartości parametrów potencjału Higgsa w kontekście jego sprzężenia z inflatonem w fazie dogrzewania powinny być szerzej skomentowane.

Rozdział 5 rozprawy doktorskiej mgr A. Sochy dotyczy pierwotnych fal grawitacyjnych, w szczególności wpływu, jakie niestandardowe mechanizmy dogrzewania mogą mieć na widmo tych fal. Widmo energii fal grawitacyjnych zależy od fazy ewolucji wszechświata, w trakcie której fale te znalazły się z powrotem pod horyzontem kosmologicznym. W rozdziale tym uzyskano interesujące ograniczenia na parametry modelu.

Rozdział 6 poświęcony jest dokładnej analizie modelu wektorowej ciemnej materii. Po wstępnych uwagach Autorka prezentuje równania ewolucji masywnego pola o spinie 1 na tle geometrii Friedmannowskiej i następnie, rozwiązując te równania, kwantuje pole wektorowe, wyznaczając następnie jego gęstość energii. Uzyskawszy ogólne rozwiązania równań pola, Autorka śledzi następnie ewolucję czasową różnych modów Fourierowskich, poczynając od ery inflacyjnej, aż do chwili, kiedy mody te powracają pod horyzont. Następnie stara się oszacować parametry opisujące powstałą w ten sposób ciemną materię konkludując, że dla ogromnego przedziału mas pola wektorowego właściwości uzyskana ciemnej materii są zgodne z obserwacjami. Szkoda, że Autorka nie pokusiła się w tym miejscu szerszy komentarz dotyczący ograniczeń na masę wektorowej ciemnej materii wynikających nie tylko z rozważań kosmologicznych, ale też astrofizycznych. Ostatnia część tego interesującego rozdziału poświęcona jest alternatywnym modelom produkcji wektorowej ciemnej materii poprzez oddziaływania grawitacyjne w post-inflacyjnym wszechświecie.

W mojej ocenie wyniki zaprezentowane w tym rozdziale są bardzo interesujące i świadczą o tym, że ciemna materia z jedynie grawitacyjnie oddziałującymi polami wektorowymi ma spory potencjał fenomenologiczny.

W moim przekonaniu rozprawa doktorska mgr A. Sochy jest bardzo dobrze napisana i prezentuje interesujące wyniki prowadzonych przez Autorkę badań. Jest jednak pewien fundamentalny aspekt kosmologicznej teorii masywnych pól wektorowych, którego wyjaśnienia nie zdołałem się w rozprawie doszukać.

Mianowicie, dlaczego rozważane, oddziałujące jedynie grawitacyjnie pola wektorowe są masywne? Dogmatem współczesnej fizyki cząstek elementarnych jest to, że istnieje jedyny uniwersalny mechanizm nadawania

masy cząstkom – mechanizm Higgsa. Wynika z tego, że cząstki oddziałujące jedynie grawitacyjnie (w szczególności nieoddziałujące z polem Higgsa) muszą być bezmasowe. Ale w takim razie, jak mogą stać się one (zimną) ciemną materią? Co więcej, jak pokazuje Autorka za pomocą jawnego rachunku „pole inflatonowe nie może przekazać swojej energii bezmasowym wektorom i fermionom poprzez oddziaływania grawitacyjne” (str. 97). Czy i dlaczego nie jest to problem w przypadku rozważanych przez Autorkę modeli?

Podsumowując, pomimo wyrażonych powyżej pewnych wątpliwości dotyczących szczegółowych aspektów rozprawy doktorskiej mgr A. Sochy uważam, że reprezentuje ona bardzo dobry poziom naukowy i dowodzi dobrej znajomości kwantowej teorii pola, ogólnej teorii względności i kosmologii. Nie znalazłem w niej żadnych poważnych błędów technicznych i pojęciowych. Rozprawa jest bardzo dobrze napisana i czyta się ją z przyjemnością. Należy podkreślić, że większość opisanych w rozprawie wyników pochodzi z oryginalnych prac naukowych autorstwa mgr A Sochy.

Mgr A. Socha jest współautorką 6 prac naukowych i sprawozdań pokonferencyjnych, które opublikowane zostały w periodykach o najwyższej międzynarodowej renomie. Prace te cytowane były dotychczas ponad 120 razy (według Inspire-Hep). W przypadku młodej doktorantki jest to znaczący dorobek naukowy.

Podsumowując, stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr Anny Sochy spełnia ustawowe, formalne i zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim z dziedziny fizyki teoretycznej. Wnoszę o dopuszczenie mgr Anny Sochy do dalszych etapów przewodu doktorskiego.


Prof. dr hab. Jerzy Kowalski-Glikman

Instytut Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Wrocławskiego i

Narodowe Centrum Badań Jądrowych

Warszawa, 10 sierpnia 2023