

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Mateusza Ducha
„Production mechanism and self-interactions of vector dark matter”

Celem rozprawy doktorskiej mgr. Mateusza Ducha, wykonanej w Instytucie Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem prof. dr. hab. Bohdana Grzadkowskiego jest zbadanie abelowego wektorowego modelu ciemnej materii.

Recenzowana rozprawa doktorska liczy 134 strony i składa się z 7 rozdziałów (włączając wprowadzenie i podsumowanie), 5 dodatków prezentujących szczegóły techniczne pominięte w tekście zasadniczym i liczącej 166 pozycji bibliografii.

Po krótkim wstępie, któremu poświęcony jest rozdział pierwszy, rozdział 2 rozprawy doktorskiej mgr. M. Ducha stanowi skrótowe wprowadzenie do problemu ciemnej materii. Zawiera ono historię tego problemu, opis modelu termicznego powstawania ciemnej materii na skutek jej „zamrożenia” (freeze-out) oraz przegląd metod detekcji, bezpośredniej i pośredniej, ciemnej materii. W moim przekonaniu rozdział ten mógłby być nieco dłuższy; w szczególności bardziej szczegółowo można by opisać metody detekcji ciemnej materii i aktualny status tej hipotezy w świetle negatywnych wyników doświadczalnych.

Kolejny, trzeci rozdział rozprawy doktorskiej mgr. M. Ducha poświęcony jest już jego oryginalnym wynikom naukowym. Opisany jest w nim, w oparciu o oryginalne wyniki uzyskane w pracy *A stable Higgs portal with vector dark matter*, napisanej wspólnie z B. Grzadkowskim i M. McGarrie, model wektorowej ciemnej materii. Przedstawione zostały następnie wyniki obliczeń określających warunki stabilności próżni. Zbadano też, stosując metodę grupy renormalizacyjnej, warunki, jakie spełniać muszą parametry modelu, aby był on perturbacyjnie dobrze określony aż do skali Plancka. Następnie zaprezentowano eksperymentalne ograniczenia na wartości parametrów modelu, wykorzystując przy tym symulacje numeryczne. Szkoda, że

wyniki tych badań nie doczekały się rozprawie bardziej szczegółowej dyskusji. Na koniec rozdziału 3 porównano przewidywania modelu wektorowego z modelem pseudo-Goldstonowskiej ciemnej materii.

W rozdziale tym brakuje, moim zdaniem dłuższej, pogłębionej prezentacji modelu wektorowej ciemnej materii, zawierającej między innymi motywacje stojące za tym konkretnym rozszerzeniem modelu standardowego. Ten brak jest szczególnie widoczny, gdy pod uwagę weźmie się fakt, że model ten jest tytułowym przedmiotem rozprawy. Również w podrozdziale 3.5 model pseudo-Goldstonowskiej ciemnej materii mógłby być zaprezentowany bardziej szczegółowo.

Rozdział 4 poświęcony jest zagadnieniu rezonansowej anihilacji ciemnej materii i napisany został w oparciu o pracę *Resonant enhancement of dark matter interactions: the case for early kinetic decoupling and velocity dependent resonance width*, której współautorem jest B. Grzadkowski. Opis rezonansowej anihilacji stanowi wyzwanie teoretyczne, a ze względu na możliwe wzmocnienie oddziaływań ciemnej materii w pobliżu punktu rezonansowego jest też bardzo ważne z perspektywy fenomenologicznej. W szczególności, możliwość rezonansowej anihilacji ciemnej materii znacząco modyfikuje proces „zamrażania” (freeze-out), mogąc skutkować znaczną redukcją ilości reliktovej ciemnej materii. Po prezentacji wyliczeń teoretycznych w rozdziale 4 przedstawiona jest szczegółowa dyskusja ograniczeń eksperymentalnych na obszar rezonansowy w przestrzeni parametrów.

Kolejny rozdział 5 rozprawy doktorskiej mgr. M. Ducha poświęcony jest innemu mechanizmowi powstawania ciemnej materii, modelowi freeze-in, którego podstawowym założeniem jest że cząstki ciemnej materii niezwykle słabo oddziałują z sektorem widzialnym. Z tego powodu eksperymentalne badanie przewidywań tego modelu jest trudniejsze niż w przypadku modeli rozważanych w poprzednich rozdziałach. W rozdziale tym zaprezentowany zostały ograniczenia na wartości parametrów tego modelu wynikające z danych obserwacyjnych.

Rozdział 6 poświęcony jest rozszerzeniu spektrum modelu wektorowej ciemnej materii o dwa fermiony Majorany, posiadające ładunek związany z dodatkową symetrią $U(1)_X$. W rozdziale tym

analizowana jest powstawanie wielokomponentowej ciemnej materii w wyniku procesów termicznych a następnie samo-oddziaływanie ciemnej materii w wyniku sprzężenia z wektorową cząstką pośrednią. Wyniki zaprezentowane w tym rozdziale pochodzą z pracy *Multi component dark matter: the vector and fermion case*, napisanej przez mgr. M. Ducha wspólnie z M. Ahmedem, B. Grządkowskim i M. Iglickim. Niestety analiza wielo-komponentowej ciemnej materii zaprezentowana w rozprawie doktorskiej nie zawiera dyskusji dotyczącej obserwacyjnych ograniczeń odnoszących się do tej teorii.

Ostatni, siódmy rozdział rozprawy stanowi jej krótkie podsumowanie.

Rozprawa doktorska mgr. Mateusza Ducha jest napisana jasno i klarownie. Zawiera ona dobre, choć krótkie, pedagogiczne wprowadzenie do teorii ciemnej materii widzianej z perspektywy teorii cząstek elementarnych oraz przejrzysty opis wyników uzyskanych w trakcie badań własnych Autora. Jak już jednak podkreślałem powyżej, dyskusja uzyskanych wyników oraz argumentów stojącymi za zastosowaniem konkretnych teorii i metod jest zdecydowanie za mało pogłębiona.

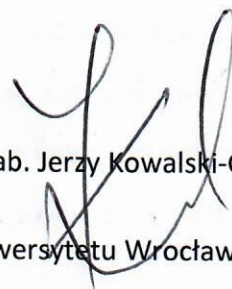
Rozprawa przygotowana została starannie zarówno pod względem redakcyjnym, jak i merytorycznym. Do rzadkości należą drobne pomyłki i błędy, a układ pracy jest bardzo przejrzysty.

Wyniki zaprezentowane w rozprawie doktorskiej mgr. M. Ducha są, w moim przekonaniu, bardzo interesujące, a publikacje, których był współautorem i które stanowiły podstawę rozprawy doktorskiej doczekały się znacznej liczby cytowań. Stanowią one oryginalny wkład doktoranta do rozwoju teorii ciemnej materii. Świadczą też o dogłębnym opanowaniu przez mgr. M. Ducha zaawansowanych metod i zagadnień pojęciowych teorii cząstek elementarnych, szczególnie w zastosowaniu do zagadnień astrofizycznych i kosmologicznych oraz Jego praktycznej znajomości metod numerycznych.

Mgr M. Duch jest współautorem 13 prac naukowych, z których 8 opublikowanych zostało w wiodących czasopismach fizycznych o zasięgu międzynarodowym: JHEP, Physical Review D i European Physical Journal C, a 4 w materiałach pokonferencyjnych, opublikowanych w Acta

Physica Polonica. Jest to liczba publikacji znacząco wyższa od tej, której oczekuje się doktorantów w dziedzinie fizyki teoretycznej. Prace mgr. M. Ducha były cytowane łącznie ponad 140 razy, co też, w przypadku młodego doktoranta, jest wynikiem znakomitym.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. Mateusza Ducha spełnia ustawowe, formalne i zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim z dziedziny fizyki teoretycznej. Wnoszę o dopuszczenie mgr. Mateusza Ducha do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Prof. dr hab. Jerzy Kowalski-Glikman

Instytut Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Wrocławskiego i

Narodowe Centrum Badań Jądrowych

Warszawa, 12 września 2019