

Prof. Michał Praszalowicz
Zakład Teorii Cząstek
Instytut Fizyki Teoretycznej
Uniwersytet Jagielloński

Kraków, 20.8.2023.

Recenzja rozprawy doktorskiej pana magistra Michała Iglickiego
p.t.
*„Collider and early-Universe interactions of dark matter
in Higgs-portal models”*

Rozprawa doktorska Pana magistra Michała Iglickiego dotyczy poszukiwania tzw. ciemnej materii, która wg oszacowań kosmologicznych wnosi około 27% do bilansu energetycznego Wszechświata, podczas gdy widzialna materia barionowa stanowi jedynie 5% (pozostałe 68% to tzw. ciemna energia). Istnienie ciemnej materii zostało potwierdzone doświadczalnie poprzez efekty grawitacyjne, jest więc całkiem możliwe, że cząstki ciemnej materii nie podlegają pozostałym oddziaływaniom modelu standardowego. Mogłyby na to wskazywać negatywne wyniki poszukiwania ciemnej materii zarówno w procesach bezpośredniej produkcji jak i poprzez poprawki wirtualne. Jeżeli cząstki ciemnej materii kontaktują się ze zwykłą materią nie tylko grawitacyjnie, to oddziaływanie takie musi być bardzo słabe. Praca pana Iglickiego używa konkretnego modelu takiego „kontaktu” poprzez mechanizm określany jako *Higgs portal*. Praca opisuje model portalu Higgsa i bada jego konsekwencje zarówno kosmologiczne jak i w fizyce doświadczalnej wysokich energii. Drugim tematem rozprawy jest regularyzacja osobliwości w kanale t , które pojawiają się w sytuacji, kiedy cząstki ciemnej materii są lekkie.

Z tego krótkiego wprowadzenia widać, że praca doktorska pana magistra Michała Iglickiego atakuje jeden z najważniejszych problemów współczesnej fizyki oddziaływań fundamentalnych i mieści się w głównym nurcie tych badań. Praca oparta jest na czterech artykułach opublikowanych we wiodących czasopismach naukowych (Journal of High Energy Physics, Nuclear Physics B oraz Physical Review D) i trzech doniesieniach konferencyjnych. Za wyjątkiem najnowszego artykułu opublikowanego w bieżącym roku w JHEP są to prace wieloautorskie i są cytowane łącznie ponad 55 razy (wg bazy InSpire.hep). Nie ma zatem wątpliwości, że zostały one zauważone i docenione na gruncie międzynarodowym. Oprócz wyżej wymienionych artykułów, na których oparta jest rozprawa pana Iglickiego, jest on współautorem trzech artykułów opublikowanych w czasopismach (cytowanych łącznie ponad 100 razy). Praca magisterska doktoranta z roku 2018 została opublikowana jako preprint w bazie arXiv. Wg bazy InSpire.hep indeks Hirscha pana magistra Iglickiego wynosi 5, jest to w mojej opinii bardzo wysoki wynik jak na młodego badacza stojącego na początku kariery naukowej. Warto też podkreślić, że niektóre z w/w prac powstały we współpracy z członkami grupy doświadczalnej CLIC.

Rozprawa doktorska pana magistra Iglickiego liczy 121 stron, podzielona jest na 7 rozdziałów oraz 8 dodatków i zawiera imponującą liczbę 200 pozycji cytowanej literatury. Przeglądając nawet pobieżnie tę obszerną rozprawę, widać, że ambicją doktoranta było nie tylko zaprezentowanie własnych wyników, które – jak zaznacza sam autor – są zawarte w rozdziałach 5. i 6., ale także omówienie istotnych dla badania ciemnej materii podstaw teoretycznych oraz doświadczalnych metod jej poszukiwania. W mojej ocenie praca jest dopracowana pod względem edytorskim, zawiera szereg rysunków i tabel umieszczonych w tekście (a nie na końcu pracy), co ułatwia lekturę. Rozprawa jest napisana po angielsku, którym to językiem autor posługuje się z dużą swobodą.

Pierwszy rozdział o charakterze przeglądowym to rozdział 2 rozprawy, gdzie autor przywołuje najważniejsze aspekty kosmologiczne, użyteczne w dalszej części pracy. Pojawia się tu równanie Friedmana, definicja stałej Hubble’a (równanie (2.5) zawiera h^2 , a ma być pierwsza potęga), dalej wzory na gęstości rozkładów. Ta część jest bardzo przejrzysta i może służyć niemalże jako podręcznik. Wywody znacznie się komplikują, gdy autor zaczyna dyskutować równanie Boltzmanna, a w szczególności wielociałowy człon kolizyjny. Autor podkreśla, że dołożył starań, aby poprawnie uwzględnić wszystkie czynniki kombinatoryczne i poprawnie obliczyć odpowiednie wagi. Ta część jest już mniej uniwersalna i być może jej fragmenty można byłoby przesunąć do dodatku. O ile dobrze rozumiem w praktyce autor używa jedynie wyników na rozpraszanie dwuciałowe i na rozpad na dwie cząstki. W rozdziale tym autor odwołuje się wielokrotnie do referencji [9], którą jest książka Kolba i Turnera wydana w serii *Frontiers in Physics* vol. 69 – w bibliografii brakuje nazwy serii, jest podany tylko tom.

Rozdział 3 poświęcony jest doświadczalnej ewidencji istnienia ciemnej materii oraz jej właściwościom. W części dotyczącej ewidencji zabrakło argumentu dotyczącego formowania się struktur we wczesnej fazie ewolucji, które powstały w wyniku kolapsu fluktuacji materii początkowo jednorodnego Wszechświata. Standardowy argument za ciemną materią jest taki, że w erze zdominowanej przez promieniowanie fluktuacje materii barionowej są rozmywane, podczas gdy ciemna materia kolapsuje. Natomiast w części dotyczącej kandydatów na ciemną materię autor nie wspomina o aksjonach, a w szczególności o danych z eksperymentu XENON1T z roku 2020, gdzie nadmiar zdarzeń odrzutu elektronów został zinterpretowany jako potencjalny sygnał cząstek aksjonopodobnych, albo wyprodukowanych na Słońcu, albo stanowiących część halo ciemnej materii Drogi Mlecznej. Poza tymi przeoczeniami autor w tym rozdziale jasno przedstawia podstawowe argumenty za istnieniem ciemnej materii, w szczególności omawia szczegółowo argumenty za tym, że ciemna materia samoddziaływuje. Omawiając model galaktycznych *halo* autor przytacza pracę [53] – niestety pojawia się tu literówka w nazwisku Andrzeja Drukiera.

Kolejny rozdział o charakterze przeglądowym, to rozdział 4 rozprawy, gdzie autor dyskutuje metody doświadczalne poszukiwania ciemnej materii i omawia szczegółowo szereg eksperymentów zarówno astrofizycznych jak i akceleratorowych. Autor dzieli metody poszukiwania ciemnej materii na trzy grupy: detekcja bezpośrednia ciemnej materii, w której zanurzona jest ziemia i układ słoneczny, pośrednia detekcja poprzez obserwację produktów oddziaływań lub rozpadów ciemnej materii zgromadzonej w centrach galaktyk oraz poszukiwania ciemnej materii w eksperymentach akceleratorowych. Ze szczegółowej dyskusji tego ostatniego punktu w podrozdziale 4.3. wynika, że chodzi tu albo o pomiar brakującej energii (w domyśle unoszonej przez nieoddziaływujące z detektorem cząstki DM), albo

obserwację wzmocnień rezonansowych na produkcję cząstek DM w zderzeniach cząstek z modelu standardowego. W tej klasyfikacji brakuje mi jednej ważnej metody, mianowicie poszukiwania nowych cząstek poprzez efekty pętlowe do różnych obserwabli, takich jak szerokości rozpadu, anomalny moment magnetyczny leptonów, w szczególności mionu, czy efektywne stałe sprzężenia dla cząstek z modelu standardowego. W dalszej części autor dość szczegółowo omawia metody detekcji, źródła tła oraz poszczególne eksperymenty – doliczyłem się w sumie prawie 40 odnośników do różnych eksperymentów, bez eksperymentów z LHC. Jest poza kompetencją tego recenzenta ocena, czy jest to lista wyczerpująca i czy wszystkie z tych eksperymentów są rzeczywiście ważne dla tematu recenzowanej rozprawy. Jak wiemy konkluzja jest raczej deprymująca – w zasadzie nie ma wyników wskazujących na istnienie oddziałujących z modelem standardowym cząstek ciemnej materii. Dla porządku uwaga redakcyjna: wydaje mi się, że na rysunku 4.2.a neutrino powinny mieć indeksy odpowiednich leptonów, tak jak to jest w przypadku 4.2.b i 4.2.c (albo należało z nich zrezygnować we wszystkich trzech rysunkach).

Kolejne dwa rozdziały stanowią „jądro” omawianej rozprawy i prezentują wyniki uzyskane przez doktoranta. Rozdział 5 zatytułowany *t-channel singularity* oparty jest na dwóch opublikowanych artykułach, przy czym większa jego część jest w zasadzie kopią samodzielnej pracy doktoranta JHEP 06 (2023) 006. Problem omawianych tu osobliwości polega na tym, że w pewnych warunkach kinematycznych wymieniana w kanale t cząstka może znaleźć się na powłoce masy, co skutkuje nieskończoną wartością amplitudy. Było dla mnie nowością, że problem ten jako pierwszy zauważył w 1961 Rudolf Peierls, o czym pan Iglicki pisze we wstępie do tego rozdziału. Fizycy cząstek zetknęli się z tym problemem przy okazji pracy Passarino i Veltmana, gdzie obliczane były poprawki pętlowe w modelu standardowym i gdzie naturalnym sposobem regularyzacji analogicznych osobliwości było uwzględnienie szerokości rozpadu bozonów Z i W . Jednak w kontekście ciemnej materii możemy mieć do czynienia z mediatorem stabilnym i wówczas trzeba szukać innych metod radzenia sobie z tym problemem.

Ponieważ pana Iglickiego interesują procesy zachodzące w centrach galaktyk, więc naturalnym podejściem było zastosowanie metod używanych w fizyce plazmy kwarkowo-gluonowej, gdzie cząstki stabilne mogą uzyskać urojony wkład do energii własnej ze względu na kąpiel termiczną, w której się znajdują. Autor stosuje formalizm Keldysha-Schwingera i oblicza w/w poprawki dla pól skalarnych, fermionów i pól wektorowych. Oczywiście nie jest zadaniem (a także jest zapewne poza możliwościami) recenzenta sprawdzenie poprawności otrzymanych wzorów, jednakże autor sprawdza ich graniczne zachowanie w dwóch przypadkach, kiedy efektywna szerokość rozpadu dąży do zera. Trochę jednak niepokoi dość lakoniczne stwierdzenie, że otrzymane wzory są zgodne z wynikami opublikowanymi w roku 1983 przez Arthura Weldon z dokładnością do czynników $1/2$ i $1/3$ odpowiednio dla fermionów i pól wektorowych.

Omawiany rozdział jest napisany starannie, ważniejsze wzory są ujęte w ramki, a na końcu pokazane są wyniki numeryczne. Widać, że autor wykazał się tu zarówno znajomością literatury jak i warsztatu teoretycznego, który zastosował do obliczeń. Detale modelu użytego do obliczeń zebrane są w dodatku C. Dwie drobne uwagi. Po pierwsze, może dobrze byłoby podać konkretną motywację wynikającą z modeli ciemnej materii, gdzie mediator M musi być stosunkowo lekki, gdyż problem osobliwości w kanale t nie występuje w rozpraszaniu dwóch

lekkich cząstek modelu standardowego wymieniających ciężką cząstkę DM. Po drugie, na stronie 52 pojawia się wielkość B , która na stronie 53 zamienia się na β , natomiast w dalszej części β oznacza odwrotność temperatury.

Następny rozdział stanowiący trzon pracy, tj. rozdział 6, warto zacząć czytać dopiero po zapoznaniu się z dodatkami A i w szczególności B, gdzie szczegółowo omówione są różne wersje modelu *Higgs portal*. W dodatku A opisany został tzw. *vector-fermion dark matter model* (VFDM), który był przedmiotem badań p. Iglickiego w pracy magisterskiej, a dodatek A jest (prawie) wierną kopią początkowych paragrafów rozdziału 6. w/w pracy. Niestety, mimo tego, wkradły się do tej części drobne pomyłki: we wzorze (A.8) pojawił się kąt α , który w następnych wzorach zniknął. Autor pisze na temat wzoru (A.8) „we assume”, ale nie tłumaczy się z tego założenia. W dalszej części autor argumentuje rozważając różne minima potencjału pól skalarnych, że minimum V_1 określone wzorem (A.15) jest globalne, jeżeli zachodzi warunek (A.20). Wydaje się, że warunek ten jest sprzeczny z podanym wcześniej warunkiem (A.12) na stabilność potencjału pól skalarnych.

Badane w rozdziale 6. modele ciemnej materii są pewnymi modyfikacjami modelu VFDM i są szczegółowo omówione w dodatku B. Modyfikacje te sprowadzają się do zmiany symetrii lokalnej na globalnej, zmiany charakteru pola spinorowego z Diraka na Majorany, lub zrezygnowanie z fermionów, zmiany zespolonego pola skalarnego na rzeczywiste. Modele te generują jeden typ cząstki kandydata na ciemną materię: albo pseudoskalar albo fermion Majorany albo bozon cechowania.

Celem analizy przedstawionej w rozdziale 6. jest zbadanie, czy w planowanych zderzaczach e^+e^- dla przykładowej energii zderzeń 250 GeV jest możliwa produkcja i obserwacja ciemnej materii (poprzez tzw. *missing mass*). Strategia, którą przyjął autor, polega na ograniczeniu parametrów modeli w oparciu o dane kosmologiczne oraz dane akceleratorowe. Wyodrębniony został najbardziej efektywny proces produkcji cząstek DM, tzw. *Higgsstrahlung*. Procesy produkcji neutrin stanowiące tło pochodzące z modelu standardowego zostały oszacowane w podrozdziale 6.3. Wyniki analizy numerycznej zostały przedstawione w podrozdziale 6.4 w postaci dwuwymiarowych wykresów konturowych pokazujących wartość przekroju czynnego na produkcję cząstek DM w zależności od dwóch specjalnie wybranych kombinacji parametrów badanych modeli. Niestety, za wyjątkiem niewielkich fragmentów w przestrzeni tych parametrów, przekroje czynne są zbyt małe, aby można efektywnie stwierdzić istnienie ciemnej materii. Niemniej jednak dozwolone wartości parametrów podsumowane na rysunku 6.8 dają pewną nadzieję, na obserwację ciemnej materii w przyszłych zderzaczach elektronowych. Autor zauważa, że możliwe będzie w tych obszarach rozróżnienie charakteru cząstek DM, tj. dyskryminacja pomiędzy trzema modelami diskutowanymi w rozprawie.

W rozdziale 6. zauważyłem drobne błędy edytorskie. Rys. 6.2 nie zawiera opisu konturów i jednego punktu doświadczalnego, które pochodzą z prac szacujących masę i przekroje czynne ciemnej materii na podstawie promieniowania gamma z centrów galaktyk. W ostatniej linijce na stronie 78 (po wzorze (6.32)) autor powinien się zdecydować, czy chce użyć *for* czy *within*. Na początku podrozdziału 6.2.2 chodzi zapewne o to, że masa cząstki h_2 jest bliska masie h_1 (a nie h_2 jak jest w tekście).

Rozprawę doktorską pana Iglickiego zamyka jednostronicowe podsumowanie – rozdział 7. Dodatki A – C omówiłem powyżej, natomiast pozostałe dodatki D – H zawierają szczegóły techniczne.

Przedstawiona mi do oceny rozprawa doktorska pana magistra Michała Iglickiego zawiera trzy wątki: wątek „erudycyjny” gdzie autor przedstawił szeroko szereg aspektów teoretycznych i doświadczalnych dotyczących ciemnej materii, oraz dwa problemy nad którymi sam pracował: problem osobliwości w kanale t oraz dyskusja możliwości odkrycia ciemnej materii w przyszłych zderzaczach elektronowych dla pewnej klasy modeli teoretycznych. Uważam, że na wszystkich tych trzech polach autor wykazał się erudycją, z zacięciem dydaktycznym przedstawił skomplikowany i bogaty materiał oraz wykonał zawansowane obliczenia i analizy wykazując się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej wnosząc jednocześnie oryginalny wkład do dziedziny poszukiwania i badania ciemnej materii. Uważam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa spełnia wszystkie ustawowe i zwyczajowe kryteria stawiane pracom doktorskim, a drobne uwagi edytorskie, o których wspomniałem w recenzji, w niczym nie wpływają na tę ocenę.

Podsumowując, wnoszę o dopuszczenie pana magistra Michała Iglickiego do obrony pracy doktorskiej.

