

Kraków, 12.09.2019

dr hab. Leszek Motyka, prof. UJ
Instytut Fizyki, Uniwersytet Jagielloński
ul. prof. Łojasiewicza 11, 30-348 Kraków
email: leszek.motyka@uj.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Mateusza Ducha

1. Ogólny opis rozprawy

Rozprawa doktorska mgr. Mateusza Ducha pt. „*Production mechanisms and self-interactions of vector dark matter*”, wykonana pod kierunkiem prof. dr. hab. Bohdana Grządkowskiego, poświęcona jest badaniom wybranych rozszerzeń Modelu Standardowego, zawierających nowe cząstki, które mogą tworzyć *ciemną materię*. W swoich badaniach autor koncentruje się przede wszystkim na minimalnych rozszerzeniach Modelu Standardowego, zawierających nowy bozon wektorowy, który uzyskuje masę poprzez oddziaływanie z dodatkowym (hipotetycznym) polem Higgsa. Proponowane nowe modele są konfrontowane z szerokim spektrum danych obserwacyjnych i eksperymentalnych dotyczących ciemnej materii: od danych kosmologicznych – ilości ciemnej materii we Wszechświecie, przebiegu pierwotnej nukleosyntezy, formacji struktur i własności mikrofalowego promieniowania tła, przez dane astronomiczne, związane ze strukturą i zderzeniami galaktyk, czy strumieniami promieni gamma i pozytonów docierających do Ziemi z przestrzeni kosmicznej, do danych z ziemskich laboratoriów: bezpośrednich detektorów cząstek ciemnej materii i eksperymentów w zderzaczach wysokich energii. W tym podejściu wyznaczone zostają podzbiory przestrzeni parametrów rozszerzonej teorii zgodne z dostępnymi danymi eksperymentalnymi i wynikami obserwacji. Ważną inspiracją badań opisanych w rozprawie jest problem rozkładów ciemnej materii na skalach sub-galaktycznych, które wskazują na znaczące efekty samoodziaływania cząstek ciemnej materii.

Tematyka poruszana w pracy jest ważna i aktualna. Silne kosmologiczne i astronomiczne przesłanki istnienia ciemnej materii pozwalają spodziewać się nowych cząstek fundamentalnych, a więc i nowych oddziaływań fundamentalnych, których bezpośrednie odkrycie powinno być możliwe w nieodległej przyszłości. Z drugiej strony, poznanie istoty ciemnej materii ma zasadnicze znaczenie dla wyjaśnienia obserwowanych własności Wszechświata, od skal kosmologicznych do skali galaktyk. Taktyka badawcza, którą realizował autor, jest rozsądna i pragmatyczna – dzięki zastosowaniu relatywnie prostych modeli nowych cząstek, można było uniknąć nadmiernej komplikacji opisu oraz mnożenia nieznanych parametrów i w efekcie uzyskać dość czytelny fizyczny kilku generycznych scenariuszy dla samooddziaływającej ciemnej materii. Otrzy-

mane wyniki mają wysoką wartość poznawczą i stanowią cenny wkład teoretyczny w program poszukiwań ciemnej materii.

Napisana po angielsku rozprawa mgr. Mateusza Ducha, przedstawiona na 134 stronach, składa się z siedmiu rozdziałów, bibliografii i dodatku. Pierwsze dwa rozdziały mają charakter wstępu, ostatni jest podsumowaniem. Rozdziały 3 – 6 zawierają opis oryginalnych wyników badań naukowych, w których uczestniczył autor. Badania będące podstawą rozprawy zostały opublikowane w siedmiu oryginalnych artykułach w bardzo dobrych czasopismach naukowych (JHEP, Eur. Phys. J C, Phys. Rev. D) oraz w czterech artykułach w materiałach konferencyjnych. Bibliografia zawiera 166 pozycji o szerokiej rozpiętości tematycznej – przede wszystkim z zakresu teoretycznej fizyki cząstek elementarnych i metod kwantowej teorii pola, ale także z astrofizyki i fizyki eksperymentalnej, w dobrej odpowiedniości do teoretyczno-fenomenologicznego charakteru rozprawy.

2. Osiągnięcia naukowe

Punktem wyjścia dla modeli cząstek ciemnej materii analizowanej w rozprawie jest rozszerzenie Modelu Standardowego przez dodanie dodatkowego abelowego pola cechowania, singletu oddziaływań Modelu Standardowego, którego wektorowe nośniki uzyskują masę za pośrednictwem dodatkowego pola Higgsa (rozdział 3). Standardowe i nowe pole Higgsa są ze sobą sprzężone. W tym scenariuszu, masywne, wektorowe, stabilne cząstki ciemnej materii słabo oddziałują ze standardową materią jedynie za pośrednictwem sektora pól Higgsa. Na tak skonstruowany model nałożone zostały ograniczenia wynikające ze stabilności rozszerzonej próżni elektroslabej z uwzględnieniem poprawek kwantowych w przybliżeniu dwupętlowym. Następnie, na parametry modelu zostały nałożone ograniczenia wynikające z danych kosmologicznych, bezpośredniej detekcji i eksperymentów akceleratorowych. Ilość ciemnej materii we Wszechświecie została obliczona w scenariuszu termicznego odsprężenia się ciemnej materii od materii standardowej we wczesnym Wszechświecie przez mechanizm *freeze-out*. Wyniki zostały porównane z wynikami analogicznej analizy przeprowadzonej dla modelu ze skalarnymi cząstkami ciemnej materii generowanej przez mechanizm Goldstone’a. Uzyskane zostały ograniczenia na masy i przekroje czynne cząstek ciemnej materii w obydwu scenariuszach.

W rozdziale 4, najbardziej zaawansowanym od strony teoretycznej, opisane zostały badania scenariusza rezonansowego wzmocnienia oddziaływań wektorowych cząstek ciemnej materii. Mechanizm taki działa w szczególnej sytuacji, w której masa cząstki pośredniczącej w procesie kreacji (lub anihilacji) pary cząstek, jest bliska sumie mas kreowanych (lub anihilowanych) cząstek. Jest to przypadek szczególnie interesujący ze względu na silną kinematyczną zmienność przekrojów czynnych, a co za tym idzie, ich silną zależność od temperatury. Dla produkcji rezonansowej poprawki kwantowe od wirtualnych par bliskich powłoki masy są duże i muszą zostać zresumowane we wszystkich rzędach rachunku zaburzeń. Spójna teoretyczna realizacja takiej resumacji jest nietrywialna, naiwna resumacja poprawek od samooddziaływania prowadzi do wyników z zależnością od wyboru cechowania, a więc niespójnych teoretycznie. W opisanych w rozprawie badaniach, rozwiązanie problemu rozpraszania rezonansowego opiera się na klasycznej technice *pinch*, która prowadzi do przekrojów czynnych zachowujących unitarność teorii i wykazujących właściwe zachowanie asymptotyczne. Opisane przez autora wyniki badań poka-

zuja, że najprostsze przybliżenie opisu procesów rezonansowych, z użyciem stałej szerokości stanu pośredniczącego (przybliżenie Breita-Wignera) działa dobrze jedynie dla małych wartości stałej sprzężenia cząstek kreowanych i stanu pośredniczącego. Na ogół konieczna jest resumacja za pomocą techniki *pinch*. Dalej autor pokazuje, że efekt rezonansowy ma duży wpływ na przebieg termicznej produkcji i anihilacji ciemnej materii we wczesnym Wszechświecie, a w konsekwencji na finalną ilość ciemnej materii i rozkład prędkości jej cząstek. W szczególności, w tym scenariuszu słabsze mogą być sprzężenia nowych cząstek do cząstek standardowych i silniejsze samooddziaływanie ciemnej materii. Przy odpowiednim dostrojeniu mas nowych cząstek można otrzymać wysokie przekroje czynne dla samooddziaływania ciemnej materii, pozwalające wyjaśnić sub-galaktyczne rozkłady ciemnej materii. Niestety, ten obiecujący scenariusz okazuje się być sprzeczny z bezpośrednimi obserwacjami dotyczącymi anihilacji par ciemnej materii, oraz wpływem wzmocnionej anihilacji na nukleosyntezę we wczesnym Wszechświecie i mikrofalowe promieniowanie tła.

Rozdział 5 rozprawy poświęcony jest analizie scenariusza z ciemną materią niezwykle słabo oddziałującą z widzialnym sektorem. W tym scenariuszu, ciemna materia oddziałuje zbyt słabo, by osiągnąć równowagę termodynamiczną ze standardową materią i jej końcowe rozpowszechnienie we Wszechświecie jest generowane przez mechanizm *freeze-in*. Wytworzony rozkład energii ciemnej materii nie jest termiczny i istotnie zależy od przekrojów czynnych na reakcję ciemnej materii w rozproszeniach standardowych cząstek oraz od możliwych rozpadów. Kluczowa analiza opisana w tym rozdziale dotyczy modeli z silnie samooddziałującą ciemną materią. Warunkiem realizacji tego scenariusza jest relatywnie mała masa dodatkowego niewidocznego bozonu Higgsa, który pośredniczy w oddziaływaniach wektorowej ciemnej materii. Dla takich modeli obliczenia przekrojów czynnych dla małych względnych prędkości cząstek ciemnej materii wymagają rozwiązania nieperturbacyjnego rozpraszania w potencjale typu Yukawy, pochodzącego od lekkiego niewidocznego skalaru Higgsa. Ciekawą własnością otrzymanych rozwiązań tego problemu jest silna zależność przekrojów czynnych od prędkości względnej rozpraszających się cząstek ciemnej materii, która pozwala pogodzić problem formacji struktur na skali sub-galaktycznej z ograniczeniami na samooddziaływanie ciemnej materii w galaktykach przy większych względnych prędkościach cząstek (np. dla układu *Bullet Cluster*). Okazuje się, że rozważane modele mają silne ograniczenia wynikające z danych eksperymentalnych i obserwacji astrofizycznych. W szczególności, wykluczony został zakres masy rzędu MeV (lub większych mas) dla niewidocznego bozonu Higgsa, natomiast w dopuszczalnym zakresie mas rzędu keV nałożone zostały silne ograniczenia na parametry modelu.

W ostatnim z rozdziałów poświęconych oryginalnym wynikom, pan Mateusz Duch przedstawia model sektora ciemnej materii rozszerzony o dwa fermiony Majorany, które stanowią główną składową ciemnej materii. Rolę lekkiej cząstki pośredniczącej (mediatora) przejmują niewidoczne wektorowe masywne bozony złamanej spontanicznie symetrii $U(1)$, omawiane we wcześniejszych rozdziałach. W tej klasie modeli ciemna materia składa się z przynajmniej trzech stabilnych składowych: dwu masywnych niewidocznych fermionów i masywnego wektorowego bozonu. Najbardziej pożądanym fenomenologicznie scenariuszem z silnym samooddziaływaniem jest realizowany w przypadku, gdy fermiony osiągają masy rzędu mas cięższych cząstek Modelu Standardowego, a pośredniczący w ich oddziaływaniach niewidoczny bozon ma masę rzędu MeV.

Podsumowując, autor prezentuje solidne i szerokie badania zaproponowanego modelu ciężkiej materii, mierząc się z problemem pogodzenia kształtu sub-galaktycznych rozkładów ciemnej materii z ograniczeniami na własności ciemnej materii pochodzącymi z obserwacji kosmologicznych, astrofizycznych, bezpośredniej detekcji ciemnej materii i eksperymentów akceleratorowych. W rezultacie, otrzymane zostają realistyczne klasy modeli ciemnej materii i możliwe zakresy ich parametrów. Przedstawiony cykl prac jest spójny i stanowi dobrze domknietą całość. Otrzymane wyniki i zastosowana metodologia są, z pewnością, wartościowym wkładem w program poszukiwań ciemnej materii.

3. Metodologia

Metodologia zastosowana w badaniach, będących podstawą rozprawy, jest solidna, badania prowadzone są rzetelnie i wnikliwie. Rozpatrywane modele rozszerzają Model Standardowy w minimalnym koniecznym stopniu, nie mnożąc nadmiarowych bytów. Zastosowane podejście opiera się na standardowych metodach: kwantowej teorii pola dla renormalizowalnych teorii cechowania z mechanizmem Higgsa. Tam, gdzie to konieczne, uwzględniane są poprawki kwantowe i ich nieskończone resumacje. Otrzymane w wyniku obliczeń przekroje czynne są następnie używane w obliczeniach o charakterze termodynamicznym, opisujących produkcję ciemnej materii we wczesnym Wszechświecie w standardowych scenariuszach *freeze-out* i *freeze-in*. Ograniczenia na parametry badanych modeli uwzględniają wszelkie dostępne dane i warunki spójności teoretycznej. Przestrzeń parametrów modeli jest przebadana standardową techniką skanowania, dzięki czemu rozprawa dostarcza całościowego spojrzenia na problem ciemnej materii w badanej klasie modeli. W badaniach wykorzystywane są m.in. publicznie dostępne narzędzia do testowania przewidywań modeli z danymi eksperymentalnymi i obserwacyjnymi. Zastosowane narzędzia teoretyczne i fenomenologiczne są wysokiej jakości.

4. Komentarze i uwagi

Najważniejszą i kluczową silną stroną pracy pana Mateusza Ducha jest zrealizowany i opisany w rozprawie program badań naukowych. Otrzymane – liczne i interesujące wyniki, z zapasem przekraczają próg wymagań, jakie powinna spełniać rozprawa doktorska. Co więcej, wybrana tematyka jest ważna i aktualna. Prezentacja wyników jest na ogół bardzo dobra, choć w pewnych aspektach pozostawia niewielki niedosyt. Rozdziały 3 – 6, w których opisane są wyniki oryginalnych badań, zawierają sporo arbitralnych stwierdzeń, co prawda podpartych odniesieniami do literatury, ale wpływających niekorzystnie na odbiór tekstu jako spójnego i kompletnego. Dotyczy to zwłaszcza opisów ograniczeń, jakie narzucają obserwacje astrofizyczne na badane modele. Z rozprawy dość trudno było mi dowiedzieć się, jak konkretnie nałożono te ograniczenia. W wielu fragmentach tekst odbiera się jako nie do końca uporządkowany. Z drugiej strony, trzeba zaznaczyć, że autor miał naprawdę niełatwe zadanie: rozprawa ma charakter w znacznej mierze fenomenologiczny i prezentacja musiała objąć dużą rozpiętość pojęciową i metodologiczną: od głównej części obliczeniowej z dziedziny teoretycznej fizyki cząstek elementarnych, przez elementy kosmologii i termodynamiki, do interpretacji danych astrofizycznych i eksperymentalnej fizyki cząstek. Do tego, nawet w obrębie klasy relatywnie uproszczonych modeli rozpatrywanych w pracy, możliwe są bardzo różnorodne i złożone scenariusze. W kontekście tej złożoności i róż-

norodności, autor poradził sobie całkiem dobrze, rozprawa pozwala dobrze zrozumieć założenia, metody, wyniki i znaczenie zrealizowanego programu badawczego. Muszę jednak zwrócić uwagę na pewien deficyt w – poza tym bardzo dobrym – wprowadzeniu do rozprawy. Mianowicie, uważam że w ogólnej dyskusji silnie oddziałującej ciemnej materii i dyskusji problemu formacji struktur sub-galaktycznych powinien zostać, choćby krótko, uwzględniony scenariusz ciemnej materii złożonej z aksjonów. Mimo tych drobnych zastrzeżeń, nie mam wątpliwości, że autor rozprawy jest wysoce kompetentny w swojej dziedzinie, ma bardzo dobrą i szeroką znajomość tematyki opisaną w rozprawie, jak również bardzo dobrą orientację w szerszym kontekście prowadzonych badań.

Na koniec, krótki komentarz dotyczący strony redakcyjnej. Praca jest obszerna i dość starannie napisana. Autor nie ustrzegł się jednak drobnych błędów redakcyjnych. Moją uwagę zwróciły np. wyraźne błędy formatowania we wzorach (5.4) i (5.10) i błąd w nagłówku Fig. 4.4 (dolny rysunek). Zauważyłem też w tekście kilka drobnych błędów literowych, które odnotowuję z obowiązku recenzenta: „Ward indenties” (str. 47), „Feynmnnn diagrams” (str. 54), powtarzający się zaimek określony „the the” (str. 61, str. 69), odnotowuję też niekonsekwencję w używaniu zamiennie form „behavior” i „behaviour”, kilkakrotnie użyta w tekście nazwa gromady galaktyk „bullet cluster” powinna być raczej pisana z wielkich liter. Zważając na obszerność pracy, liczba tych drobnych pomyłek jest relatywnie niewielka i nie wpływają one na czytelność pracy oraz ogólną dobrą ocenę jakości redakcji.

5. Podsumowanie

Nie mam żadnych wątpliwości co do wysokiej jakości osiągnięć naukowych i rozprawy doktorskiej mgr. Mateusza Ducha. Liczne uzyskane wyniki opublikowane w siedmiu oryginalnych artykułach tworzą spójną i domknietą całość. Metodologia badań jest wysokiej próby, zastosowane jest szerokie spektrum nowoczesnych narzędzi fizyki teoretycznej i fenomenologii cząstek elementarnych i astrofizyki. Jakość prezentacji i redakcji jest dobra.

Dlatego stwierdzam, że przedłożona rozprawa spełnia wszystkie wymagane kryteria i z przyjemnością wnoszę o przyznanie panu Mateuszowi Duchowi stopnia doktora nauk fizycznych.

dr hab. Leszek Motyka

