



Katowice, 21 sierpnia 2023 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Michała Iglickiego
"Collider and early-Universe interactions of dark matter
in Higgs-portal models"

Na pracę doktorską magistra Michała Iglickiego liczącą 121 stron składa się siedem rozdziałów, osiem dodatków oraz odnośniki do 200 prac naukowych. Została ona napisana na podstawie czterech artykułów opublikowanych w latach 2019-2023 w bardzo dobrych czasopismach Journal of High Energy Physics (2 prace), Nuclear Physics B (1 praca), Physical Review D (1 praca) oraz trzech artykułach pokonferencyjnych. Na uwagę zasługuje fakt iż jedna z prac opublikowanych w JHEP jest monoautorska.

Tematem rozprawy jest próba określenia możliwości odkrycia ciemnej materii (DM) w zderzaczach wysokich energii oraz określenie możliwych efektów związanych z oddziaływaniami DM we wczesnych stadiach ewolucji Wszechświata. Jeśli ciemna materia jest nową, obecnie nieznaną, fundamentalną cząstką (masywną oraz stabilną), to miałoby sens, gdyby nabywała masę w ten sam sposób jak pozostałe cząstki elementarne, czyli poprzez oddziaływanie ze skalarnymi cząstkami. Można więc rozszerzyć sektor skalarny Modelu Standardowego (SM) wprowadzając pole sprzężone ze stanami ciemnej materii. Jeśli stan wprowadzonej cząstki skalarnej miesza się równocześnie ze standardowym polem Higgsa, otrzymujemy sprzężenia pomiędzy standardowym Higgsem oraz ciemną materią. W ten sposób sprzężenia pomiędzy polami skalarnymi tworzą równocześnie pomost pomiędzy SM i DM, nazwany portalem Higgsa. Wyjaśnienie genezy tych pojęć znajduje się w krótkim wprowadzeniu w rozdziale pierwszym rozprawy.

Rozdział drugi poświęcony jest zagadnieniom kosmologicznym, wprowadzono pojęcia stałej Hubble'a, gęstości barionowej oraz zimnej ciemnej materii, stałej kosmologicznej. Następnie wyprowadzono termodynamiczne równanie Boltzmanna dla oddziałujących cząstek w rozszerzającym się Wszechświecie wraz z dyskusją mechanizmu wymrożenia oddziaływań dla poszczególnych procesów i cząstek, który zależy od stopnia anihilacji (przekrojów czynnych). W rozprawie rozpatrywane są jedno (FDM) oraz wieloskładnikowe (VFDM) modele ciemnej materii. Równanie Boltzmanna przeanalizowano w obu tych modelach. W równaniu tym pojawiają się człony odpowiadające za rozpraszanie i rozpady cząstek oraz zidentyfikowano zależne od energii elementy amplitudy z osobliwością w kanale t . Problem rozbieżności procesów rozpraszania cząstek w kanale t i jego regularyzacji jest jednym z głównych problemów obliczeniowych rozwiązanych w rozprawie, szczegółowo omówiony w rozdziale piątym.

Rozdział trzeci rozprawy zawiera zwięzły ale treściwy opis własności oraz dowody eksperymentalne istnienia problemu ciemnej materii. O niedoborze masy we Wszechświecie wynikającym z dynamiki różnych układów obiektów (gromady, galaktyki) świadczą w pierwszej kolejności ich krzywe rotacji i zależność szybkości obrotu związanych obiektów od odległości od centrum danego układu. Niezależną ewidencję DM przynosi analiza anizotropii mikrofalowego promieniowania tła (CMB). Zimna DM wpływa na charakterystykę gęstości CMB, dokładniej na czynnik tłumienia w jego oscylacyjnym widmie. Również zderzenia gromad dają informację o różnicy w dystrybucji świecącej materii w stosunku do tej uzyskanej z soczewkowania grawitacyjnego. Informacje te pozwalają ograniczyć siłę samooddziaływania skupisk ciemnej materii i analiza np. gromada "Bullet" daje argumenty przeciwko teoriom z modyfikowaną siłą grawitacji. Opisane efekty definiują DM jako nierelatywistyczną, niebarionową, nienaładowaną oraz stabilną materię, bardzo słabo oddziałującą z cząstkami SM. Jako przykłady takiej materii w rozdziale trzecim omówiono obiekty MACHO (asteroidy, planety, gwiazdy neutronowe, karły i czarne dziury), pierwotne czarne dziury, zmodyfikowaną grawitację, gorącą i zimną niebarionową materię (neutrino). Rozdział trzeci kończą rozważania na temat okresowej modulacji prędkości względnych Słońca i Ziemi względem otoczki DM naszej galaktyki, konieczności uwzględnienia samooddziaływania ciemnej materii w mniejszych skalach, oddziaływania takie występują w rozpatrywanych modelach FDM i VFDM.

W rozdziale czwartym opisano sposoby detekcji DM, które podzielono na trzy kategorie: bezpośrednia (w detektorach), pośrednia (astrofizyczne, poszukiwanie produktów anihilacji lub rozpadów DM) oraz odkrycia w akceleratorach. Istnieje imponująca lista prowadzonych lub proponowanych/planowanych eksperymentów (XEONIT, LUX, PANDAX-II, COHERENT, XENON, EDELWEISS, CDEX, DarkSide, PICO, MOSCAB, NEWS-G, NEWAGE, DAMA/LIBRA, ANAIS, COSINE-100DAMIC, SENSEI, DMS-QUARE, CoGeNet, NEWSdm, PTOLEMY), w których oczekiwana jest bezpośrednia detekcja DM, w oparciu o różne charakterystyki i zjawiska opisane w rozprawie. Pośrednie detekcje dotyczą poszukiwania sygnałów od centrów DM w galaktykach karłowatych, Drogi Mlecznej, dyskach akrecyjnych, ale również pojedynczych gwiazdach i planetach. Do detekcji np. promieniowania gamma używa się satelity Fermi-LAT, promieniowanie Cherenkova bada się w eksperymentach H.E.S.S, MAGIC, VERITAS, pozytrony (antymaterię) będącą wynikiem działania DM bada się w eksperymentach AMS, PAMELA, CAPRICE, MASS, HEAT. Osobną grupę stanowią eksperymenty neutrinowe IceCube, ANTARES, KM3NeT (pośrednia detekcja DM z Drogi Mlecznej) oraz Super- i Hyper-Kamiokande (DM Słońca). Ciekawy efekt DM krótko omówiony w rozprawie to podgrzewanie planet przez oddziaływanie z DM (bada się Ziemię, Uran, Jowisz, Neptun). Efekty oddziaływań DM poszukuje się również w LHC (podano obecne ograniczenia na masy i sprzężenia cząstek DM). W rozprawie dyskutowane są także przyszłe akceleratorzy leptonowe, szczególnie ważne ze względu na małe tło, dużą świetność oraz duże energie dające możliwość odkrycia ciężkich cząstek DM (szczegóły przewidywań dla tych zderzaczy dyskutowane są w rozdziale siódmym).

W rozdziale piątym przedstawiono sposób regularyzacji osobliwości w kanale t , która pojawia się, gdy masywny, stabilny propagator (w pracy określany jako mediator) w kanale t danego procesu jest na powłoce masy, co powoduje, że przekrój czynny jest nieskończony. Problem ten znany jest z fizyki hadronów od lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku, najczęściej do jego obejścia stosuje się jako regulator skończony wymiar wiązki lub nielocalne efekty źródło-detektor w przypadku oscylacji neutrin. Dla gazu termicznego i procesów rozproszeniowych we wczesnym Wszechświecie, rozpraszania nie mają ograniczenia przestrzennego, dlatego nie można zastosować wymienionych sposobów regularyzacji. Z tego powodu w rozprawie zastosowano rozwiązanie zaproponowane w pracy Giudice i współpracowników (praca [172]) oraz pracy Weldona [173], w której obliczono urojoną część energii własnej oddziaływania między mediatorem a otaczającym gazem. Przeanalizowano propagatory o spinach 0, 1/2, 1. Dzięki oddziaływaniom termicznym, czas życia cząstki pośredniczącej w oddziaływaniach jest skończony, generując efektywną szerokość połówkową zależną od pędu i temperatury. W rezultacie przekrój czynny staje się skończony. W pracy wyprowadzono analityczne warunki kinematyczne na relacje pomiędzy masami cząstek biorących udział w procesach rozproszeniowych prowadzących do osobliwości w kanale t (nierówności 5.23a oraz 5.23b) oraz nadano im fizyczną interpretację poprzez cięcie propagatora odpowiedzialnego za osobliwość w odpowiednim diagramie Feynmana, proces ten został graficznie przedstawiony na Rys. 5.3. Wynik dla efektywnej szerokości połówkowej wyprowadzono w formalizmie Keldysh-Schwingera, regulatorem jest zespolona część szerokości połówkowej w przybliżeniu zaburzeń na poziomie pierwszej pętli. Odpowiednie relacje dla propagatorów skalarnych, fermionowych i bozonowych o spinie 1 wyprowadzono wykonując całkowanie po energii oraz parametrach przestrzennych czteropędów propagatora (przy warunku iż cząstki są na powłoce masy). Główny wynik obliczeń i relacje na efektywną, zregularyzowaną (dodatnią, skończoną, różną od zera) szerokość połówkową przedstawia wzór 5.78.

W rozdziale szóstym omówiono produkcję i detekcję DM w modelach z portalem Higgsa w przyszłych akceleratorach e^+e^- . W obliczeniach uwzględniono ograniczenia nałożone na rozważane modele (model DM z pseudo-Goldstonem, FDM, VDM) przez wyniki eksperymentalne (jak wartości gęstości DM) i ograniczenia teoretyczne (takie jak perturbacyjność teorii) i wyznaczono obszar przestrzeni parametrów, w których możliwe jest powstanie portalu Higgsa z cząstkami DM w akceleratorze ILC. Niestandardowe parametry dla których przedyskutowano wyniki to: kąt mieszania pomiędzy SM oraz dodatkową cząstką skalarną (α), wartość oczekiwana próżni dla cząstki skalarnej BSM (v_S), masa cząstki DM (m_{DM}), masa skalarnej cząstki skalarnej BSM (m_{h_2}). Uwzględniono odpowiednie ograniczenia na te parametry z analizy pośredniej i pośredniej detekcji DM oraz z eksperymentu LHC. W obliczeniach numerycznych skupiono się na procesie Higgstrahlungu, w którym cząstka skalarna wyprodukowana wraz z bozonem Z w zderzeniu e^+e^- rozpada się na dwie cząstki DM. Sygnałem jest więc pojedynczy bozon Z z niedoborem energii w stanie końcowym, który także istnieje w SM przy produkcji neutrin (oszacowano więc odpowiednie tło $e^+e^- \rightarrow Z\nu\bar{\nu}$). Wyniki numeryczne przedstawiono na

wykresach 6.8 - 6.10. Wyniki pokazują, iż dla modeli pGDM (DM jako cząstka pseudo-Goldstone), FDM (fermionowa cząstka DM), VFDM (bozonowa cząstka DM) większość przestrzeni parametrów jest zabroniona przez dostępne ograniczenia eksperymentalne lub odpowiadają zbyt słabym sygnałom, aby cząstki DM mogły zostać wykryte. Niemniej jednak nadal istnieje kombinacja parametrów prowadzących do efektywnej produkcji DM w przyszłych zderzaczach e^+e^- . Przewidywane sygnały DM są zbliżone: maksymalny możliwy przekrój czynny w procesie Higgsstrahlungu, z rozpadem stanu Higgsa na cząstki DM, wynosi około 60 fb. Jednakże kształt dozwolonej przestrzeni parametrów jest nieco inny dla każdego modelu, co w zasadzie może umożliwić rozróżnienie przypadków różnych spinów (Rys. 6.11 i 6.12).

Rozprawa doktorska dotyczy jednej z najtrudniejszych zagadek współczesnej fizyki dotyczącej wytłumaczenia problemu istnienia ciemnej materii. Pokazano jaką rolę mogła odgrywać DM we wczesnych stadiach rozwoju Wszechświata, przedstawiono ogólny sposób obliczenia efektywnej, skończonej szerokości połówkowej propagatorów przenoszących oddziaływania z udziałem DM. W sposób jasny przedyskutowano sposoby ich odkrycia, również w sposób sztuczny, poprzez procesy ich produkcji w zderzeniach e^+e^- . Wyniki rozprawy mają zastosowanie do szerokiego zakresu modeli cząstek oraz procesów w których pojawia się osobliwość w kanale-t z rozpadami cząstek na masywne, stabilne produkty. Warto podkreślić, iż w rozprawie podano pełne wyprowadzenie i wynik analityczny dla efektywnej szerokości połówkowej. Praca napisana jest starannie, nie zauważyłem niedociągnięć wartych odnotowania. Drobne uwagi. W dwóch miejscach zaznaczono iż wyniki w pracy Weldon są zgodne z przedstawionymi w sekcji 5.5, z dokładnością do stałej wartości liczbowej wynoszącej $1/2$ dla cząstki fermionowej i $1/3$ dla cząstki wektorowej. Nie skomentowano w jaki sposób upewniono się który wynik jest prawidłowy. Pod koniec rozdziału piątego nie ma dyskusji uzyskanych wyników i ich znaczenia dla Γ_{eff} oraz $\langle \sigma v \rangle$ (Fig. 5.10 - 5.13). W rozdziale szóstym nie potrafiłem znaleźć referencji czy też uzasadnienia dla postaci wzoru na przekrój czynny (6.1). Obliczenia dla mono-Z produkcji cząstek DM wykonano dla ILC i energii $\sqrt{s} = 250$ GeV pisząc iż "metodologię i wyniki opisane tutaj można zastosować do badań innych zderzaczy pracujących przy podobnych energiach, takich jak FCC-ee lub CEPC". Po co więc to wyróżnienie? Czy też może zaprezentowane wyniki wyróżniają w szczególny sposób możliwości zderzacza ILC jako przyszłego zderzacza e^+e^- i testów własności cząstek DM?

Moim zdaniem rozprawa doktorska w pełni spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim i wnioskuje o dopuszczenie mgra Michała Iglickiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.