

dr hab. Andrzej Hryczuk

Tel.: +048 22 273-2829

e-mail: andrzej.hryczuk@ncbj.gov.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Michała Łukawskiego

Informacje podstawowe

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska, zatytułowana *Phenomenology of thermally produced hot and cold dark relics in naturalness-motivated extensions of the Standard Model* przygotowana została pod kierunkiem dr hab. Marcina Badziaka, prof UW i składa się z ośmiu rozdziałów, dwóch dodatków oraz bibliografii zawierającej 341 pozycje. Praca została napisana w języku angielskim.

Chociaż nie jest to jednoznacznie określone, należy wnioskować, że podstawę rozprawy stanowią trzy artykuły opublikowane w latach 2022-2024 w *Journal of High Energy Physics* (2 prace) oraz *Symmetry* (1 praca; *Symmetry* 2023, 15(2), 386). Co zaskakujące, ta ostatnia nie jest cytowana w rozprawie. Najprawdopodobniej jest to przeoczenie edytorskie, gdyż część przedstawionych wyników zostało bezpośrednio z niej zaczerpniętych (cf. rysunki 7.7-7.9). Wszystkie trzy prace mają po czterech autorów. W przypadku jednego z artykułów Pan Łukawski pełnił rolę autora korespondencyjnego.

Omówienie rozprawy

Tematem pracy jest analiza fenomenologiczna dwóch różnych modeli fizyki spoza Modelu Standardowego motywowanych dwoma problemami występowania tzw. precyzyjnego dostrojenia (ang. fine tuning): problemem łamania CP w oddziaływaniach silnych oraz problemem hierarchii. Oba te problemy stanowią istotne zagadnienia badawcze w teorii cząstek elementarnych. Istnieje w literaturze przedmiotu wiele pomysłów jak wytłumaczyć obserwowaną konieczność precyzyjnego dostrojenia wartości parametrów Modelu Standardowego (MS), które często stanowią motywację do badań nad nowymi teoriami mogącymi rozszerzyć i tym samym zastąpić Model Standardowy. Aby móc określić, czy dany pomysł bądź model ma szansę prowadzić do takiej teorii potrzebne jest wykonanie analiz fenomenologicznych, obliczając przewidywania eksperymentalne oraz konsekwencje kosmologiczne, aby móc porównać je z doświadczeniem. Wyniki takich prac opisuje przedłożona rozprawa odnośnie dwóch modeli: astrofobicznego aksjonu oraz supersymetrycznego modelu z bliźniaczym Higgsem (z ang. Twin Higgs).

Rozdział pierwszy pracy stanowi zwięzłe wprowadzenie do problemu badawczego podjętego w rozprawie. Nakreśla obraz z lotu ptaka. Dobrze spełnia tę funkcję, choć występuje w nim kilka nieścisłości. Dla przykładu stwierdzenie, że *cząstka* Higgsa powoduje łamanie symetrii elektro-słabej, gdy w istocie to *pole* Higgsa, lub że teoria oddziaływań elektro-słabych *wymaga* istnienia nowej cząstki skalarnej. Zbyt silne są też stwierdzenia mówiące, że ciemna materia nie może oddziaływać elektromagnetycznie oraz, że każda cząstka sprzężona do MS jest koniecznie produkowana termicznie we wczesnym Wszechświecie. Oba mają wyjątki i mogą być mylnie zrozumiane.

Rozdział drugi przedstawia wstęp do tematyki pracy rozpoczynając od zagadnienia naturalności i precyzyjnego dostrojenia oraz omawia problem łamania CP w oddziaływaniach silnych oraz problem hierarchii. W zasadzie jest to program (zaawansowanych) podręczników z teorii fizyki cząstek i teorii pola, jednak rzeczywiście potrzebny do umotywowania dalszych części pracy. Sposób opisu jest dosyć szczegółowy i poprawny, choć moim zdaniem momentami mógłby być bardziej czytelny. Dla przykładu w podrozdziale 2.2 trudno uchwycić myśl przewodnią oraz czasem nagle pojawia się nowe, zupełnie nieoczywiste pojęcie, jak równania grupy renormalizacji w równaniu (2.10), bez wytłumaczenia jego pochodzenia oraz znaczenia. Różne stwierdzenia pojawiają się „z powietrza”, np. nagle mowa o mezonach, choć nie było nic o uwięzieniu kwarków, lub też wycalkowanie ciężkich kwarków od razu używa równań ruchu, bez ich wprowadzenia. Niemniej jednak całościowo opis spełnia rolę wprowadzenia do następujących rozdziałów.

Dalsza część rozdziału odnosi się do zagadnienia ciemnej materii. Przedstawione są obserwacje stanowiące dowody jej istnienia w sposób skrótowy, lecz poprawny i wystarczający. Podobnie wprowadzone są potrzebne dalej podstawowe fakty dotyczące detekcji bezpośredniej i niebezpośredniej. Trochę bardziej rozwinięty jest opis wyznaczania gęstości reliktovej ciemnej materii, szczególnie biorąc pod uwagę również Dodatek B.

Rozdział trzeci omawia teoretyczne podstawy modeli przewidujących istnienie aksjonów. Jest to pierwszy rozdział pracy zawierający elementy oryginalne (obliczenia sprzężeń aksjon-kaon), choć w większości to przegląd literatury i materiałów podręcznikowych. Część przeglądowa jest napisana w sposób dosyć szczegółowy i wyczerpujący. Pokazuje też zrozumienie tematu przez Autora. W części odnoszącej się do konstrukcji modeli aksjonów może mieć też wartość pedagogiczną, gdyż w literaturze często na ten element kładziony jest mniejszy nacisk. Za to kosmologia aksjonów, podrozdział 3.5 przedstawiona jest niezwykle skrótowo. Chociaż nie stanowi to elementu układanki potrzebnego w dalszych rozdziałach, pozostawia pewien niedosyt.

W rozdziale tym znajduje się też dobry przykład jak nieoptymalny dobór przez Autora kolejności opisu może utrudniać zrozumienie tekstu. Podrozdział 3.1 ma tytuł „Rozwiązanie Peccei-Quinn” jednak zaczyna się od argumentu Vafy-Wittena odnośnie zachowania parzystości a minimum energii dla teorii typu QCD. Z tego wyprowadzany jest fakt, że aksjony muszą być polem dynamicznym, bo wtedy minumizuje to potencjał. Jednak nie ma wcześniej ani słowa czym aksjon jest, ani też o symetrii Peccei-Quinn, która to dopiero pojawia się w następnym podrozdziale.

Następnie w rozdziale czwartym Autor przechodzi do omówienia modeli aksjonów astrofobicznych – czyli takich, dla których sprzężenia aksjonu-nukleon są bardzo słabe, ze względu na odpowiednie przypisanie ładunków. Sama idea takich realizacji symetrii Peccei-Quinn nie pochodzi od Autora, jednak w rozdziale znajdują się oryginalne wyniki, w szczególności odnośnie warunków dla i klasyfikacji modeli tego typu. Tutaj przedstawienie materiału jest czytelne i wartościowe dla czytelnika zainteresowanego podobnymi modelami.

Rozdział piąty opisuje wyniki pierwszej opublikowanej pracy współautorskiej i dotyczy ograniczeń obserwacyjnych na istnienie aksjonów, w szczególności astrofobicznych, wynikających z kosmologii. Wpierw omówione są tematy takie jak potencjalny wpływ na promieniowanie mikrofalowe tła oraz gęstość reliktowych aksjonów, a następnie przedstawione rachunki przekrojów czynnych i ich znaczenia dla członu kolizyjnego w równaniu Boltzmanna. Jeden z tych przekrojów, rozpraszania aksjonów na kaonach, stanowi oryginalny wkład powyższej rozprawy. Ten rachunek nie odbiega znacząco od pozostałych, jednak stanowi pewien nowy przyczynek potrzebny do dalszej analizy.

Najważniejsze wyniki tego rozdziału opisane są w sekcji 5.5 i odnoszą się do produkcji oraz przewidywań sygnałów od aksjonów astrofobicznych, w kontekście kilku możliwych realizacji powyższego scenariusza. Ich znaczenie to przede wszystkim uzupełnienie literatury o analizę i status ograniczeń wynikających z obserwacji, które dla nie-astrofobicznych aksjonów są o wiele słabsze niż wynikające z astrofizyki, jednak których szczegółowe wzięcie pod uwagę jest konieczne w modelach astrofobicznych.

Rozdział szósty przenosi dyskusję na drugi model analizowany w przedłożonej rozprawie: bliźniaczego Higgsa. Wpierw następuje wprowadzenie do oryginalnego modelu oraz pokrótce przedstawione są występujące w nim trudności (w szczególności odnośnie przewidywań co do dodatkowych lekkich cząstek oraz ograniczeń związanych z ΔN_{eff}). Następnie podrozdział 6.2 wprowadza supersymetrię, w sposób zwięzły, lecz wystarczający i czytelny. I wreszcie w ostatnim podrozdziale opisana jest supersymetryczna wersja modelu bliźniaczego Higgsa. To rozszerzenie umotywowane jest dodatkowym ustabilizowaniem masy bozonu Higgsa względem poprawek kwantowych i zmniejszeniem pozostałego fine-tuningu względem modeli tylko supersymetrycznych (jak MSSM), lub tylko z bliźniaczym Higgsem. Główny nacisk opisu zawartego w tym rozdziale odnosi się do tego problemu.

Rozdział siódmy omawia wyniki pozostałych dwóch opublikowanych artykułów i skupia się na fenomenologii ciemnej materii w modelu wprowadzonym w rozdziale poprzednim. Ze względu na wielowymiarowość przestrzeni parametrów w analizowanej teorii konieczne było przyjęcie pewnych założeń i tym samym skoncentrowanie się na kilku realizacjach. Przeprowadzona i przedstawiona jest analiza dwóch najbardziej obiecujących kandydatów na cząstkę ciemnej materii w tym modelu, mianowicie bliźniaczego stau oraz bina. Dla obu przypadków przeanalizowane zostało spektrum, ograniczanie detekcji bezpośredniej, gęstość reliktowa oraz limity z kilku kanałów w LHC. Dodatkowo dla bliźniaczego stau także samo-oddziaływanie ciemnej materii. Powodem dla tego ostatniego jest istnienie bliźniaczego bezmasowego fotonu sprzężonego do bliźniaczego stau (lecz nie bina) i tym samym oddziaływania długo-zasięgowego. Nie jestem jednak przekonany czy ograniczenia na w ten sposób samo-oddziałującą ciemną materię zostały przedstawione wyczerpująco. W szczególności, przedyskutowana eliptyczność galaktyk sferycznych choć zwykle daje najsilniejsze ograniczenia nie jest jedynym efektem samo-oddziaływania. Dla przykładu istnieją limity ze zderzeń gromad galaktyk, czy wpływu na tworzenie struktur na małych skalach. Sam bliźniaczy foton może też mieszać się kinetycznie z widzialnym, a jeśli w tym modelu nie jest to możliwe, powód nie został przedyskutowany w rozprawie.

Wyniki analizy w podrozdziałach 7.1.6 oraz 7.2.4 przedyskutowane zostały dokładnie i wyraźnie. Stanowią one też niewątpliwie wkład do literatury przedmiotu istotny z punktu widzenia badanego modelu. W momencie publikacji artykułów oba przypadki (tj. bliźniaczego stau oraz bina) zawierały obszar parametrów z dozwolonym kandydatem na cząstkę ciemnej materii oraz charakteryzującego się naturalnością. W momencie przygotowania rozprawy ten pierwszy zaczął być w lekkim konflikcie z wynikami eksperymentu LZ, jednak wciąż możliwy do uratowania przy niewielkiej zmianie parametrów.

Czego brakowało mi w tym rozdziale to odniesienia się do narzucającego się pytania: czy umoty-
wowanie naturalnością skali elektroslabej jest wystarczające dla tak bizantyjskiego rozszerzenia
MS, jakim jest supersymetryczny model bliźniaczego Higgsa. Odpowiedź na to pytanie dla mnie
osobiście nie jest oczywista. I choć zrozumiałe jest przyjęcie istniejącego w literaturze modelu
jako punktu wyjściowego do dalszych badań, mile widziana by była głębsza refleksja nad tym
zagadnieniem. Dodatkowo zaskoczył mnie brak cytowania pracy Symmetry 15 (2023) 2, 386,
której Pan Łukawski jest współautorem, a z której pochodzi np. Rys 7.8 i 7.9.

Rozdział ósmy zawiera zwięzłe, lecz wyczerpujące podsumowanie uzyskanych wyników. Jedy-
nie w niewielkim stopniu pojawia się tu spojrzenie z szerszej perspektywy bądź dyskusja nad
dalszymi krokami badań.

Na koniec rozprawa zawiera dwa dodatki. Oba stanowiące raczej materiał podręcznikowy, jak
wyprowadzenia niektórych używanych w rozprawie wzorów, i przydatne są dla kompletności
pracy.

Podsumowując, praca w sposób satysfakcjonujący, lecz odbiegający od idealnego wprowadza
szeroką gamę tematów na poziomie przeglądu literatury, aby następnie przedstawić wyniki ory-
ginalnych badań Autora. Wyniki te są interesujące i mają znaczenie dla dziedziny.

Edytorsko rozprawa sprawia momentami wrażenie napisanej naprędce. Układ rozdziałów zdarza
się być mało płynny, np. 2.4.1 na 2.4.2, oraz poza rozdziałem wstępnym brakuje szerszego oglądu
(jak dany rozdział odzwierciedla się w całości). Na jakość tekstu rzutuje też liczba błędów edy-
torskich. Nie tylko literówki, również w równaniach np. brak pochodnej w (2.111), czy czynnika
 g^2 w (7.25), ale również pozostawienie w jednym miejscu komentarza "(s?)" czy pozostawienie
kluczy bibtex zamiast cytowania na stronie 107. A także powtarzające się w kilku miejscach
pracy przypisanie masy nukleonom rzędu 900 GeV, zamiast MeV (o ile się nie mylę wszędzie,
gdzie te wartości się pojawiają). A także mnóstwo drobniejszych literówek, czy braków znaków
interpunkcyjnych.

Niemniej jednak, całościowo rozprawa napisana jest czytelnym językiem i zrozumiała nawet przy
pierwszym czytaniu.

Podsumowanie

Przedłożona rozprawa, choć nie pozbawiona mankamentów w sposobie prezentacji oraz licznych
niedociągnięć edytorskich, spełnia moim zdaniem kryteria wymagane w postępowaniu o nada-
nie stopnia doktora. Demonstruje wystarczającą wiedzę i zrozumienie zagadnienia oraz szerszej
fizyki cząstek, w szczególności w obrębie podstaw i metod teorii spoza Modelu Standardowego.
Przedstawia też oryginalne rozwiązanie problemów naukowych, dotyczących klasyfikacji różnych
modeli astrofobicznych aksjonów i analizie ich fenomenologii oraz odpowiedzi na pytanie o prze-
widywania modelu supersymetrycznego bliźniaczego Higgsa dla fizyki ciemnej materii.

Wnoszę o dopuszczenie mgr. Michała Łukawskiego do dalszych etapów postępowania o nadaniu
stopnia doktora.

Z poważaniem,

Podpisany elektronicznie przez
Andrzej Jan Hryczuk
14.04.2025
10:28:04 +02'00'