

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Michała Łukawskiego pt. „Phenomenology of thermally produced hot and cold dark relics in naturalness-motivated extensions of the Standard Model”

Przedmiotem rozprawy doktorskiej mgr. Michała Łukawskiego, wykonanej w Instytucie Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem dr. hab. Marcina Badziaka, prof. UW, jest badanie kosmologicznych ograniczeń na parametry dwóch modeli fizyki cząstek elementarnych, cechujących się „naturalnością”. Rozważanymi modelami są „astrofobiczne aksjony” (astrophobic axions) oraz „supersymetryczny model bliźniaczych Higgsów” (supersymmetric Twin Higgs model).

Recenzowana rozprawa doktorska liczy 191 stron i składa się ze streszczenia, wstępu, sześciu rozdziałów merytorycznych, podsumowania, dwóch dodatków i liczącej 341 pozycje bibliografii.

Wstęp rozprawy doktorskiej mgr. M. Łukawskiego zawiera krótki rys współzależności teorii cząstek elementarnych i kosmologii, w których na plan pierwszy wybijają się próby powiązania rozszerzeń Modelu Standardowego z enigmatycznymi cząstkami tworzącymi ciemną materię. W tym kontekście Autor zarysowuje we Wstępie zakres badań, których wyniki zaprezentowane są w następnych rozdziałach rozprawy. Chociaż wstęp ten jest jasny i zrozumiały nie ustrzegł się w nim Autor pewnego przeszarżowania, pisząc „So far all observations are consistent with Λ CDM model”, które to stwierdzenie wydaje się nieco dziwne w sytuacji, gdy olbrzymia część kosmologów stara się zrozumieć rozbieżności między obserwacjami a tym standardowym modelem kosmologicznym, znane pod nazwą „Hubble tension” albo ostatnie pomiary wykonane przez Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI), wskazujące na ewolucję ciemnej energii.

Rozdział 2 rozprawy doktorskiej przedstawia argumenty na rzecz konieczności wyjścia poza ramy Modelu Standardowego fizyki cząstek elementarnych. Składa się on z kilku podrozdziałów. W pierwszym z nich Autor krótko zarysowuje zagadnienie naturalności. W podrozdziale tym brakuje,

moim zdaniem, refleksji, że nienaturalność staje się problemem przy założeniu, że schemat Efektywnej Teorii Pola obowiązuje znacznie powyżej skali Modelu Standardowego – zapewne aż do skali Plancka – co nie jest jasne z teoretycznego punktu widzenia, ani, oczywiście, nie zostało potwierdzone obserwacjami. Kolejny podrozdział tego rozdziału poświęcony jest szczegółowemu omówieniu „strong CP-problem”, będącego wstępem do dyskusji aksjonów w rozdziale 3. Podrozdział ten jest dobrze napisany i klarowny, choć na stronie 16 w masach neutronu i cząstki eta’ użyto GeV zamiast MeV. Podrozdział 2.3 poświęcony jest opisowi problemu hierarchii na przykładzie poprawek radiacyjnych do masy cząstki Higgsa. Tu również pojawia się argument naturalności i moje uwagi powyżej odnoszą się też do tego podrozdziału. Ostatni podrozdział 2.4 poświęcony jest ciemnej materii i opisuje jej powstanie we wczesnym wszechświecie oraz ograniczenia wynikające z bezpośrednich i pośrednich obserwacji.

Rozdział 3 rozprawy doktorskiej mgr. M. Łukawskiego poświęcony jest opisowi teorii aksjonu. Po zaprezentowaniu ogólnych właściwości modelu aksjonowego, Autor przechodzi do analizy jego niektórych konkretnych realizacji, aby następnie rozważyć ograniczenia na sprzężenia aksjonu. Wyniki opisane w tej części rozprawy doktorskiej oparte są, w pewnej mierze, na oryginalnym dorobku naukowym Autora. Rozdział ten kończą krótkie rozważania dotyczące możliwych konsekwencji istnienia aksjonów dla teorii młodego wszechświata, w szczególności jako (składnika) ciemnej materii.

Na tym kończy się przeglądowa część rozprawy doktorskiej. W mojej ocenie jest ona dobrze i przejrzysto napisana i zawiera informacje konieczne do uczynienia z rozprawy samodzielnej całości. Ta część rozprawy doktorskiej dowodzi, że mgr. M. Łukawski opanował zaawansowane zagadnienia fizyki cząstek elementarnych, jest biegły w literaturze przedmiotu i w technikach stosowanych w tej dziedzinie fizyki teoretycznej.

Rozdział 4 rozprawy doktorskiej poświęcony jest konstrukcji modelu „astrofobicznych aksjonów” i oparty jest na oryginalnych badaniach Autora, opublikowanych w pracy M. Badziak, K. Harigaya, M. Łukawski, and R. Ziegler, *Thermal production of astrophobic axions*, JHEP **09** (2024) 136. Modele te stanowią rozszerzenie modelu DFSZ i posiadają dodatkowe dublety cząstek Higgsa jak również cząstkę skalarną. Aksjony w tej klasie modeli słabo sprzęgają się do nukleonów, co

pozwała na ominięcie niektórych ograniczeń (wynikających na przykład z analizy emisji neutrin przez supernową SN1987A). W rozdziale tym analizuje się szczegółowo sektory kwarkowy i leptonowy, zaś ostateczny model jest kombinacją jednej z możliwych realizacji każdego z tych sektorów. W ostatnim podrozdziale tego rozdziału szczegółowo analizowane konkretne modele „astrofobicznych aksjonów” z dwoma lub theme dubletami cząstek Higgsa.

Rozdział 5 rozprawy doktorskiej poświęcony jest badaniu kosmologicznych konsekwencji istnienia astrofobicznych aksjonów. Również ten rozdział oparty jest na wynikach opublikowanych w pracy M. Badziak, K. Harigaya, M. Łukawski, and R. Ziegler, *Thermal production of astrophobic axions*, JHEP **09** (2024) 136. Astrofobiczne aksjony mogą być cięższe niż aksjony w innych modelach, zaś ich masa może być rzędu kilku eV. Są one jednak na tyle lekkie, że przed rekombinacją mogą być z dobrym przybliżeniem traktowane jako bezmasowe. Tak więc w kosmologicznym modelu aksjonowym pojawiają się dwa nowe parametry: masa aksjonu i jego wkład do efektywnej liczby cząstek relatywistycznych. W rozdziale tym mgr M. Łukawski liczy wkłady do równania Boltzmanna pochodzące od zderzeń leptonowych, pionowych i kaonowych, gdzie te ostatnie są oryginalnym wynikiem Autora; aby następnie zrekapitulować wyniki wyżej wymienionej pracy w kontekście wkładu aksjonu do efektywnej liczby neutrinowych stopni swobody, w przypadku różnych modeli astrofobicznych aksjonów. W podsumowaniu do tego rozdziału Autor zauważa, że przewidywania niektórych z tych modeli mogą być potwierdzone lub wykluczone obserwacyjnie, przy użyciu planowanych obserwatoriów.

Kolejny rozdział rozprawy doktorskiej poświęcony jest supersymetrii i mechanizmowi bliźniaczych cząstek Higgsa. Jego celem jest uzasadnienie i wprowadzenie modelu będącego połączeniem obu mechanizmów. Taka konstrukcja motywowana jest faktem, że uzyskany model wolny jest od niektórych problemów związanych z naturalnością skali elektroślabej, trapiących jego poszczególne składniki. Ponadto cząstki opisane tym modelem mogą tworzyć ciemną materię.

Ostatni, siódmy rozdział głównej merytorycznej części rozprawy doktorskiej poświęcony jest szczegółowemu badaniu właściwości i kosmologicznych konsekwencji supersymetrycznego modelu bliźniaczego, wprowadzonego w poprzednim rozdziale. W szczególności analizowane są

tu dwie hipotetyczne cząstki, bliźniacze stau i bliźniacze neutralino, które mogą, jeśli istnieją, być składnikami ciemnej materii.

Następny rozdział podsumowuje rozprawę doktorską, zaś kolejne dwa to dodatki, poświęcone kwantowej teorii pola i kosmologii. W tym ostatnim przypadku, tytuł „Cosmology of Homogeneous Universe” nie wydaje się być adekwatny do treści; zawarto w nim bowiem analizę jedynie kosmologii jednorodnego, izotropowego wszechświata.

Synergiczne współdziałanie kosmologii, astrofizyki i fizyki wysokich energii ma długą tradycję, datującą się od czasów, kiedy znajomość fizyki jądrowej pozwoliła na zrozumienie składu chemicznego wszechświata i ewolucji gwiazd. To kosmologowie trafnie pokazali, że liczba rodzin leptonów w Modelu Standardowym wynosi 3, na długo zanim potwierdzone zostało to w doświadczeniach akceleratorowych. Dzisiejsze palące problemy kosmologii, zrozumienie czym jest ciemna materia i ciemna energia, jaki jest mechanizm inflacji itd. mogą, choć nie muszą, znaleźć swoje satysfakcjonujące rozwiązanie w ramach modeli fizyki cząstek elementarnych. Z drugiej strony, fizykę cząstek elementarnych również trapią fundamentalne problemy, związane z wewnętrznymi napięciami Modelu Standardowego, zaś obserwacje astrofizyczne i kosmologiczne dostarczają wielu ograniczeń na parametry modeli uogólniających Model Standardowy. Analizowanie modeli fizyki cząstek elementarnych w kontekście astrofizycznym i kosmologicznym jest więc jak najbardziej na miejscu i może dostarczyć interesujących informacji umożliwiających postęp w obu tych dziedzinach.

Powiedziawszy to, nie mogę jednak nie dać wyrazu swoim wątpliwościom. Jak już napisałem powyżej, konstrukcja modeli opisanych w rozprawie doktorskiej mgr. M. Łukawskiego ma swoje źródło w niezachwianej – jak mi się zdaje – wierze, że fizyka w skalach energii powyżej skali Modelu Standardowego opisana jest kwantową teorią pola, tak że wystarczy tylko zgadnąć poprawnie nowe lokalne pola kwantowe, by nie tylko opisać fizykę w dowolnej skali, poniżej skali Plancka, ale też wyjaśnić czym jest ciemna materia, a może nawet – ciemna energia. Ale nawet jeśli przekonanie to jest prawdziwe, to mam wątpliwości czy budowanie kolejnych modeli, bez poznania ich głębszych struktur i rządzących nimi zasad ma sens, szczególnie w świetle faktu, że

stasowanie tej strategii nie przyniosło powodzenia przez dziesięciolecia. Mam nadzieję, że mgr M. Łukawski zechce się odnieść do tych wątpliwości w trakcie obrony rozprawy doktorskiej.

Mgr Michał Łukawski jest (współ-)autorem czterech oryginalnych prac naukowych (w tym jednej samodzielnej) i jednego doniesienia konferencyjnego. Taki dorobek uznawany jest jako adekwatny w przypadku doktoratu z dziedziny fizyki teoretycznej.

Pomimo wyrażonych przeze mnie powyżej wątpliwości i drobnych uwag, uważam, że rozprawa doktorska mgr. M. Łukowskiego stoi na wysokim poziomie merytorycznym i jest dobrze napisana. Dowodzi ona szerokiej wiedzy Autora i jego głębokiej znajomości technik rachunkowych fizyki teoretycznej, w szczególności kwantowej teorii pola, fizyki cząstek elementarnych i kosmologii.

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



Prof. dr hab. Jerzy Kowalski-Glikman

Narodowe Centrum Badań Jądrowych i

Instytut Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Wrocławskiego

Warszawa, 21 kwietnia 2025