

Fenomenologia termicznie produkowanych gorących i zimnych ciemnych reliktyw w motywowanych naturalnością rozszerzeniach modelu standardowego

Michał Łukawski

Streszczenie

W niniejszej rozprawie doktorskiej badamy fenomenologię dwóch klas modeli motywowanych kryterium naturalności, które wykazują termiczną produkcję ciemnych reliktyw: modele astrofobicznych aksjonów oraz supersymetryczne modele Twin Higgs.

W pierwszej kolejności analizujemy produkcję astrofobicznych aksjonów, które unikają astrofizycznych ograniczeń przez tłumienie sprzężeń do elektronów i nukleonów bez zwiększania stałej rozpadu aksjonu. Ponieważ astrofobiczne aksjony mają tłumione sprzężenia do pionów, są głównie produkowane w rozpadach łamiących liczby leptonowe oraz w rozprośzeniach leptonów, z generycznie obecnym niezaniechanym wkładem z rozprośzeń kaonów. W zależności od masy aksjonu, populacja aksjonów zachowuje się jako ciemne promieniowanie lub ciepła ciemna materia, co uwzględniamy wykorzystując ograniczenie na gęstość energii aksjonów zależne od masy, sparametryzowane przez dodatkową efektywną liczbę neutrin, ΔN_{eff} . Wykazujemy, że w astrofobicznych modelach aksjonowych z 2 dubletami Higgsa, ograniczenie kosmologiczne wynosi $f_a \gtrsim 8 \times 10^6$ GeV i jest słabsze lub porównywalne do ograniczeń astrofizycznych na sprzężenia aksjon-mion i aksjon-foton, w zależności od dokładnych sprzężeń modelu. Pokazujemy, że przewidywane czułości przyszłych eksperymentów CMB znacznie poprawią ograniczenie kosmologiczne, badając zakres do $f_a \simeq 10^8$ GeV. Ponadto omawiamy, jak uogólnienie modelu do trzech dubletów Higgsa umożliwia dodatkowe tłumienie wspomnianych sprzężeń, dalej osłabiając ograniczenia astrofizyczne i umożliwiając masę aksjonu rzędu eV. Klasyfikujemy modele astrofobicznych aksjonów w 3HDM na podstawie ich tłumionych sprzężeń i analizujemy ich fenomenologię. Większość modeli astrofobicznych jest w zasięgu obserwowalności Simons Observatory lub CMB-S4, oraz/lub w zasięgu IAXO lub nawet BabyIAXO. W modelu naturalnie astrofobicznym aksjony są produkowane wyłącznie poprzez efekty nieperturbacyjne, których obliczenie pozostaje wyzwaniem. Nasza estymacja ograniczenia kosmologicznego może być tak silna jak $f_a \gtrsim 5 \times 10^6$ GeV dla zanikającego sprzężenia z dziwnym kwarkiem, co potencjalnie pozwala na wyjaśnienie asymetrii barionowej poprzez aksjogenezę i zapewnienie nierelatywistycznej populacji aksjonów odgrywających rolę ciemnej materii produkowanej poprzez mechanizm kinetic misalignment.

Następnie badamy dwóch kandydatów na ciemną materię produkowanych poprzez mechanizm freeze-out w supersymetrycznych modelach Twin Higgs: twin stau oraz twin neutralino. Twin stau jest naładowany względem bliźniaczego elektromagnetyzmu, mediowanego przez bezmasowy foton. Nasze badania wykazały, że głównie prawoskrętne twin stau o masie między 400 a 500 GeV stanowi możliwego kandydata na ciemną materię, spełniając ograniczenia wynikające z detekcji bezpośredniej, doświadczeń w zderzacach, astrofizyki i kosmologii. Dyskutujemy sygnatury zderzeniowe scenariusza z ciemną materią w postaci twin stau oraz perspektywy badania tego scenariusza za pomocą przyszłych eksperymentów detekcji bezpośredniej, podkreślając, że eksperyment LZ zbada większość naturalnych obszarów przestrzeni parametrów, odpowiadających dostrajaniu lepszemu niż kilka procent. Wykazujemy, że zdominowane przez twin bino neutralino również stanowi potencjalnego kandydata na ciemną materię i pokazujemy, że nadprodukcja może zostać złagodzona poprzez wprowadzenie złamania symetrii $\mathbb{Z}_2$ w sektorze Yukawy, co nie narusza rozwiązania problemu hierarchii, jednocześnie łagodząc problem promieniowania ciemnego. Podobnie jak w przypadku ciemnej materii w postaci twin stau, ten scenariusz zostanie najlepiej zbadany za pomocą eksperymentów detekcji bezpośredniej. Eksperyment LZ zbada większość naturalnych obszarów przestrzeni parametrów, odpowiadających dostrajaniu lepszemu niż 10%.

W pracy doktorskiej wykazujemy, że obserwacje kosmologiczne dostarczają silnych ograniczeń na modele charakteryzujące się termiczną produkcją ciemnych reliktyw, badając skale energii niedostępne dla eksperymentów naziemnych. Łącząc obserwacje astrofizyczne, laboratoryjne i kosmologiczne, przeprowadzamy kompletną analizę modeli, podkreślając złożoną interakcję między modelami fizyki cząstek a kosmologią.