

Prof. dr hab. Marek Zrałek
Instytut Fizyki
Uniwersytetu Śląskiego

Katowice 5.11.2014

**Recenzja pracy doktorskiej mgr Aleksandry Drozd
pt.**

„Multi-Component Dark Matter and Extensions of the Standard Model Scalar Sector”

Praca doktorska mgr Aleksandry Drozd poświęcona jest analizie niektórych rozszerzeń Modelu Standardowego (MS), mogących wyjaśnić istotę Ciemnej Materii (CM) we Wszechświecie. Ta problematyka jest, z naukowego punktu widzenia, niezwykle ważna. Obecny MS cząstek elementarnych nie posiada w swoim zestawie składników materii takich cząstek, które mogą odpowiadać za obserwowaną we Wszechświecie dodatkową masę wpływającą w znaczący sposób na ruch galaktyk.

Praca napisana jest w języku angielskim na 160 stronach. Zawiera wstęp, zakończenie, sześć rozdziałów, trzy uzupełnienia i spis literatury. Cztery zasadnicze rozdziały rozprawy (4,5,6, i 7) są oparte na ośmiu artykułach, których mgr Aleksandra Drozd jest autorką lub współautorką. Cztery z tych prac są już opublikowane w JHEP, dwie ukazały się w Acta Physica Polonica B jako materiały z konferencji, dwie nie są publikowane. Pozostałe dwa rozdziały zostały opracowane na podstawie ogólnie dostępnej literatury. Trzeba przyznać, że jest to bez wątpienia pokaźny, jak na pracę doktorską, dorobek naukowy.

Przejdę obecnie to krótkiego omówienia poszczególnych rozdziałów. Rozdział 1 (wstęp) przedstawia główne problemy MS, które uzasadniają tematykę pracy. Autorka zalicza do nich kwestię CM jako taką, rozkład jej gęstości w galaktykach (tzw. core-cusp problem), nie wyjaśnione do końca powiększenie stosunku rozpadu cząstki Higgsa na dwa fotony a także wewnętrzne teoretyczne kłopoty MS (tzw. problem hierarchii czy też kwestię stabilności próżni modelu). Nie są to wszystkie problemy MS, o których się dyskutuje, ale wymienienie tych właśnie w kontekście tematyki pracy jest właściwe. Podano krótkie omówienie całej pracy i na końcu opis przyjmowanych skrótów. Nie są to jednak wszystkie skróty, w pracy można znaleźć wiele innych w tym opisie nie zawartych.

Rozdział 2 analizuje niezbędne informacje kosmologiczne, potrzebne w dalszej części pracy. Jako, że problem jest bardzo obszerny, nie da się go opisać na czterech stronach. W związku z tym można tu znaleźć jedynie bardzo suche wzory bez potrzebnego do zrozumienia komentarza. Pewnie to drobiazg, ale w dwóch różnych znaczeniach pojawia się w tym rozdziale symbol Ω , raz jako kąt bryłowy i ponownie jako stosunek obserwowanej gęstości materii do gęstości krytycznej.

Rozdział 3 poświęcony problemowi ciemnej materii ma inną strukturę. Jest, w przeciwieństwie do rozdziału poprzedniego, znacznie bardziej drobiazgowy i składa się z wielu podrozdziałów. Najpierw podaje fakty obserwacyjne, które zmuszają do uznania CM jako realnego bytu. Dalej omówione zostały własności CM i ogólne sposoby możliwej detekcji. Przeanalizowano gęstość reliktową tego promieniowania i jego gęstość obecną. Na

końcu opisane zostały różne sposoby możliwej przyszłej detekcji CM, w tym detekcji bezpośredniej, wynikającej z oddziaływania z cząstkami występującymi w naszej widzialnej materii. Taka detekcja zależy od prawdopodobieństwa oddziaływania CM z cząstkami MS a więc od przyjętego modelu. Na końcu omówiono obecny status eksperymentalny poszukiwania CM. Pomimo doniesień z różnych eksperymentów donoszących o obserwacji CM, aktualna opinia o takich obserwacjach, dokonana po bardziej dokładnej analizie, jest negatywna.

Kolejne 4 rozdziały bazują głównie na 4 opublikowanych pracach w JHEP, ale jest tam też dużo wykresów i analiz teoretycznych wykonanych na potrzeby doktoratu. Te cztery rozdziały to najważniejsza część pracy doktorskiej. Każdy z rozdziałów opisuje jeden konkretny teoretyczny model, uogólnienie MS, w których pojawiają się różne dodatkowe cząstki mogące stanowić CM. Każdy z rozdziałów ma podobną strukturę. Przedstawiony jest sam model, omówione są teoretyczne i eksperymentalne ograniczenia na jego parametry i na końcu analizowana jest szansa obserwacji nowych cząstek, które mogą tę CM stanowić.

Rozdział 4 poświęcony jest modelowi, który uogólnia MS dodając do niego N nienaładowanych cząstek skalarnych o tej samej masie. Cząstki te oddziałują jedynie pomiędzy sobą oraz z cząstką Higgsa MS. Parametry takiego modelu można tak dobrać, aby były spełnione wszystkie ograniczenia teoretyczne, a także obecne ograniczenia doświadczalne. Rozdział bazuje na pracy [26] współautorstwa Doktorantki. Wiele analiz z tej pracy przeniesiono do doktoratu. Spowodowało to, iż Autorka nie czuła potrzeby wyjaśniania wielu wątków i oznaczeń, np. wielkości h_i we wzorze (75) i dalszych albo g_i ze wzoru (92) i (93). Nie podoba mi się także wprowadzenie oznaczenia na zbiór pól ϕ_i w postaci $\vec{\phi} = 1, \dots, N$.

Poza tym we wzorze (66) zamiast $D_\mu H^+ D^\mu H$ powinno być $(D_\mu H)^+ D^\mu H$. Pochodna kowariantna, bo pewnie to ma tu Autorka na myśli, też podlega hermitowskiemu sprzężeniu.

Kolejny rozdział 5 analizuje popularne rozszerzenie MS tzw. model z dwoma dubletami cząstek Higgsa, w którym po złamaniu symetrii cechowania pozostają cztery dodatkowe cząstki mogące stanowić CM. Analiza została zrobiona w oparciu o dwie prace [8] i [9]. Aby uniknąć występowania w najniższym rzędzie rachunku zaburzeń prądów neutralnych zmieniających zapach, Autorka ogranicza się do dwóch rodzajów modelu znanych w literaturze pod nazwami typ I oraz typ II. Jeden z podrozdziałów poświęcony został nieco większemu, w porównaniu do przewidywania MS, stosunkowi rozpadu dla cząstki Higgsa na dwa fotony $H \rightarrow \gamma\gamma$. Jeśli kolejne eksperymenty (w szczególności LHC) potwierdzą tutaj niezgodność z doświadczeniem będzie to argument za koniecznością rozszerzeniem MS, w którym prawdopodobnie znajdzie się miejsce na cząstki CM. W tym rozdziale Autorka także nadmiernie oparła się o opublikowane prace i nie definiuje precyzyjnie wprowadzanych wielkości np. kąt mieszania α na początku str. 62.

Rozdział 6 przedstawia model z dwoma dubletami Higgsa powiększony o jeden skalarny singlet oddziałujący z wszystkimi cząstkami Higgsa z dwóch dubletów. Podobnie jak w poprzednich rozdziałach analiza została oparta o ostatnio przyjętą do druku pracę [74]. Na początku przedstawiony jest Lagrangian modelu i podane parametry fizyczne po spontanicznym złamaniu symetrii. Autorka wprowadziła inne, w porównaniu z poprzednim rozdziałem oznaczenia dla dubletów Higgsa. W Lagrangianie (125) po spontanicznym

złamaniu symetrii brakuje dwóch członów (człon masy cząstki skalarnej S i jej oddziaływanie z najlżejszą cząstką Higgsa). Podobnie jak poprzednio kąt mieszania α nie został zdefiniowany. Następnie Autorka szeroko omawia teoretyczne i eksperymentalne ograniczenia na parametry modelu włączając obserwowane ograniczenia na reliktową gęstość CM . Na końcu rozdziału opisuje możliwość detekcji CM w różnych pracujących w chwili obecnej detektorach.

Rozdział 7 opisuje tzw. dwuskładnikową CM i bazuje na dwóch opublikowanych pracach [32] i [33]. Jednym składnikiem jest nienaładowana cząstka o spinie 0, a drugim jest fermion o spinie $\frac{1}{2}$ będący własną antycząstką – neutrino Majorany. Na poziomie pierwszego przybliżenia, skalarna cząstka ϕ oddziałuje z cząstką Higgsa MS , neutrino Majorany sprzęga się zaś jedynie ze skalarą ϕ . Taka tematyka rozdziału nie jest w pełni zgodna z tytułem pracy doktorskiej, który zapowiada wyjaśnienia CM poprzez rozszerzenia skalarnej części MS , a więc nie fermionowej. Tak czy inaczej jednak Autorka poszukuje cząstek mogących stanowić CM , a więc ta drobna nieścisłość, jest do zaakceptowania. Podane są ograniczenia na parametry modelu wynikające z obecnej reliktovej gęstości DM i z bezpośrednich poszukiwań cząstek DM . Omówiona została też możliwość obserwacji cząstek tego modelu w przyszłych eksperymentach.

Podsumowanie (rozdział 8) jest faktycznie krótkim streszczeniem otrzymanych wyników. Trzy uzupełnienia zbierają wszystkie potrzebne w pracy formuły i stanowią dodatek ułatwiający lekturę rozprawy doktorskiej.

Całą rozprawę doktorską uważam za bardzo dobrą. Czyta się ją dobrze, zwłaszcza opis wyników eksperymentalnych różnych doświadczeń. Na uwagę zasługuje fakt, że praca została oparta o 4 ważne artykuły opublikowane w dobrym czasopiśmie. Moich kilka uwag krytycznych nie ma istotnego znaczenia. Recenzowana rozprawa doktorska wymagała dobrych umiejętności analizy obecnych faktów doświadczalnych. Oprócz tego mgr Aleksandra Drozd udowodniła, że w dobrym zakresie poznała fizykę Modelu Standardowego oraz astrofizyczny problem obserwacji i teoretycznego wyjaśniania ciemnej materii.

Pracę oceniam jako bardzo dobrą i wnoszę o dopuszczenie mgr Aleksandrę Drozd do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Marek Zrałek

