

2018 -05- 25

Prof. dr hab. Marek Zrałek
Instytut Fizyki
Uniwersytetu Śląskiego

Katowice 15.05.2018

Recenzja pracy doktorskiej mgr Pawła Szczerbiaka
pt.

„Własności ciemnej materii i ich związek z sektorem Higgsa w wybranych uogólnieniach Modelu Standardowego”

Praca doktorska mgr Pawła Szczerbiaka poświęcona jest próbie opisu ciemnej materii przy założeniu, że stanowią ją cząstki elementarne nie występujące w Modelu Standardowym (SM). Problem jest niezmiernie ważny, mamy bowiem niezbite dowody, że we Wszechświecie, oprócz materii zbudowanej ze znanych cząstek, występuje mechanizm powodujący znaczne oddziaływanie grawitacyjne, popularnie określny jako **ciemna materia**. Najprostsze, chociaż nie jedyne, jest założenie, że dodatkowe obserwowane oddziaływanie grawitacyjne, powodują nieznane w SM obiekty posiadające masę. Obecne dane eksperymentalne z wielu prowadzonych doświadczeń ograniczają masę tych nieznanich cząstek oraz ich oddziaływania z pospolitą materią występującą we wszechświecie. Te ograniczenia w istotny sposób zależą od rozpatrywanego modelu rozszerzającego MS. W ocenianej pracy doktorskiej Autor bada czy ciemna materia może być opisywana przez najbliższą cząstkę w trzech uogólnieniach MS: w minimalnym supersymetrycznym rozszerzeniu MS (MSSM), w modelu supersymetrycznym z bogatszym sektorem Higgsa (NMSSM), w obu przypadkach dla tzw. zimnej ciemnej materii oraz w modelu Weinberga dla tzw. gorącej ciemnej materii. W pracy wszystkie dopasowania parametrów są prowadzone głównie w oparciu o dane doświadczalne funkcjonującego od 2013 roku ksenonowego detektora LUX (Large Undergrand Xenon).

Recenzowana praca doktorska napisana jest w języku polskim na ponad 100 stronach, zawiera wstęp, 5 rozdziałów zasadniczych i podsumowanie. Prócz tego szczegóły rachunkowe zostały przedstawione w 3 niewielkich uzupełnieniach i na końcu podany jest spis literatury (76 pozycji). Mgr Paweł Szczerbiak zredagował swoją pracę doktorską w oparciu o trzy artykuły opublikowane w dobrych czasopismach oraz czwartą pracę wydaną w materiałach pokonferencyjnych (materiał tam zawarty był przedstawiany na międzynarodowej konferencji w 2015 roku przez Autora). We wszystkich czterech publikacjach mgr Szczerbiak jest jednym z trzech współautorów.

W krótkim Wstępie Autor uzasadnia czemu problem ciemnej materii jest ważny i dlaczego cząstek stanowiących zimną ciemną materię warto szukać w supersymetrycznych rozszerzeniach MS. Podaje też strukturę pracy i związek poszczególnych rozdziałów z opublikowanymi artykułami. Niestety jest to jedyne miejsce, gdzie można znaleźć związek treści pracy doktorskiej z publikacjami, w których mgr Szczerbiak jest współautorem. W dalszych rozdziałach, które bazują na publikacjach, takich odnośników brakuje.

W Rozdział 2, w bardzo wielkim uproszczeniu, Autor podaje teoretyczne podstawy modeli supersymetrycznych. Najpierw przedstawione są argumenty motywujące atrakcyjność supersymetrii z najważniejszym, w kontekście tematyki pracy, istnieniem neutralnych słabo oddziałujących cząstek mogących opisywać zimną ciemną materię. Następnie podane są lagrangiany pól Higgsa oraz ich supersymetrycznych partnerów w modelu MSSM, a także w drugim modelu wykorzystywanym w pracy, z poszerzonym sektorem cząstek Higgsa (NMSSM). Zagadnienia te są dogłębnie opisane w literaturze, nie są jednak zawsze stosowane te same oznaczenia. Utrudnia to analizę doktoratu. Należałoby cytować prace, z których zaczerpnięto przedstawione wzory a tu nie znajdujemy żadnych takich odnośników. W podrozdziale 2.5 opisane są przekroje czynne na oddziaływanie hipotetycznych cząstek ciemnej materii z nukleonami i jądrami w ogólności. Formalnie błędów nie znajduję, ale analiza nie jest absolutnie pogładowa. Są to podstawowe zagadnienia dla problemu detekcji ciemnej materii, a więc dla dalej prowadzonych w pracy badań. Mógł więc Autor bardziej wnikliwie przedstawić przekroje czynne zależne (σ_{SD}) i niezależne (σ_{SI}) od spinu. Brakuje tu nawet wyjaśnienia, że chodzi o spin cząstek pośredniczących w oddziaływaniu.

Rozdział 3 bazuje na pracy [3] opublikowanej w Phys. Lett. B w ubiegłym roku. Przeprowadzona analiza pokazuje, że odpowiednio dobrane neutralino w minimalnym modelu supersymetrycznym (MSSM) spełnia, chociaż z trudem, wszystkie ograniczenia eksperymentalne, w tym te wynikające z najnowszych danych z eksperymentu LUX i wciąż może stanowić cząstkę zimnej ciemnej materii. Obszar, w którym te ograniczenia są spełnione jest niewielki, i kolejne bardziej precyzyjne eksperymenty (np. XENON1T lub LZ) mogą wykluczyć ten najprostszy model supersymetryczny z grona modeli, które są w stanie wyjaśnić problem ciemnej materii. Przedstawiona w tym rozdziale analiza jest wartościowa, a liczba cytowań niedawno opublikowanej pracy wskazuje na spore zainteresowanie tą tematyką.

Rozdział 4 oparty został praktycznie w całości na opublikowanej pracy [4] w 2016 roku w JHEP, z wyjątkiem podrozdziału 4.5.2, który w znacznym stopniu bazuje na pracy [6] opublikowanej w materiałach konferencyjnych na początku 2016 roku. Analiza tu przedstawiona dotyczy modelu supersymetrycznego z poszerzonym sektorem Higgsa o jeden dodatkowy singlet. Powoduje to, iż najlżejsze neutralino (tradycyjnie określane jako LSP = *Lightest Supersymmetric Particle*) może być teraz kombinacją większej liczby stanów i uzyskujemy dodatkowe możliwości sterowania swobodnymi parametrami. Można je tak dobrać aby przekrój czynny dla rozpraszania cząstek LSP z nukleonami był równy zero - nazywamy to „ślepyimi” punktami modelu. Autor najpierw przytacza definicje parametrów, następnie analizuje te ślepe punkty w różnych sytuacjach w przestrzeni tych parametrów. Na końcu rozdziału przytacza szereg interesujących wniosków, z których wynika, że przekroje czynne na oddziaływanie hipotetycznych cząstek LSP z nukleonami zależne od spinu będzie odgrywało istotną rolę w testowaniu modelu.

Kolejna część pracy (Rozdział 5) poświęcony jest relacji warunków, jakie spełniają parametry modelu NMSSM w tzw. ślepych punktach, a gęstością reliktową. Podobnie jak w poprzednich przypadkach rozdział bazuje na najnowszej publikacji współautorstwa mgr Pawła Szczerbiaka (JHEP, 1707 (2017) 050). Założono, że oprócz warunku znikania przekroju czynnego na rozpraszanie cząstki LSP z nukleonami nałożony został także

warunek, aby gęstość reliktowa zgadzała się z obserwacjami. Te dwa warunki udało się uzgodnić. Przestrzeń parametrów została silnie ograniczona w porównaniu z wynikami poprzedniego Rozdziału, ale pomimo tego, znaleziono szereg interesujących obszarów, które Autor dokładnie opisuje w kolejnych trzech podrozdziałach.

Przedostatni Rozdział pracy odbiega od głównej tematyki i poświęcony jest gorącej ciemnej materii. Tak określane są cząstki o masie mniejszej niż 1 eV. Autor najpierw określa efektywną liczbę rodzajów neutrin. Następnie zajmuje się równaniem Boltzmanna dla cząstek relatywistycznych i omawia różne jego przybliżenia. Najważniejszą częścią rozdziału jest analiza modelu zaproponowanego przez Weinberga w 2013 roku, którego celem było wyjaśnienie dodatkowej efektywnej liczby rodzajów neutrin. W modelu tym wprowadzono dodatkowe pole skalare i dodatkowy fermion Diraca o odpowiednich własnościach symetrii. Warto zaznaczyć, że rozdział ten nie jest oparty na wcześniejszych publikacjach z udziałem Autora, jest więc bezpośrednio napisany na potrzeby pracy doktorskiej.

Rozdział ostatni zbiera wnioski przeprowadzonej analizy. Najważniejsze osiągnięcie Autora to pokazanie, że pomimo silnych ograniczeń na fizykę poza MS wynikających z ostatnich eksperymentów, w szczególności z LHC, wciąż istnieją możliwości wytłumaczenia istniejącej we wszechświecie ciemnej materii w oparciu o analizowane modele. Kluczowe będą przyszłe doświadczenia testujące oddziaływanie hipotetycznej ciemnej materii ze znaną materią barionową.

Recenzowana rozprawa doktorska dokumentuje duży nakład pracy Autora. Przedstawiona w pracy doktorskiej analiza wymagała dobrej znajomości Modelu Standardowego, jego supersymetrycznych uogólnień a także niezbędnej wiedzy z astrofizyki i kosmologii.

Z mankamentów jakie dostrzegam to brak systematycznego cytowania skąd Autor czerpał różne informacje, z jakich źródeł pochodzą formuły teoretyczne. W wielu miejscach brak jest wyczerpującego opisu przedstawionych faktów. Mam poza tym wrażenia, że Autor nie dość wnikliwie przeczytał pracę po jej napisaniu. W wielu miejscach pojawiają się błędy drukarskie i zwykłe pomyłki. Podaje tylko kilka takich sytuacji:

- już na początku na str. 3 pojawia się skrót LSP, który został zdefiniowany dopiero na str. 8,
- na str. 6 użyte zostały różnych oznaczeń $\hat{\phi}_i$ lub $\hat{\Phi}_i$ na te same superopla,
- na str. 9 zamiast $v_s = \langle v \rangle$ powinno być $v_s = \langle S \rangle$,
- wzór (2.30) jest niepoprawny,
- w spisie literatury pojawia się dwa razy ta sam pozycja; [13] = [74].

Wszystkie te uwagi utrudniają czytanie pracy, ale nie mają fundamentalnego znaczenia. Pracę oceniam jako **bardzo dobrą** i wnoszę o dopuszczenie Pawła Szczerbiaka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Marek Zrałek

