

prof. dr hab. Wiesław Andrzej Kamiński
Wydział Matematyki, Fizyki i Informatyki
Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej

O P I N I A

o rozprawie doktorskiej mgr **Aleksandry Drozd**

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

I. Motywacje i treść rozprawy oraz jej podstawowe wyniki

Rozprawa doktorska p. mgr Aleksandry Drozd została poświęcona jednemu z ciekawszych zagadnień współczesnej astrofizyki i fizyki oddziaływań, tj. problemowi wyjaśnienia pochodzenia i składu ciemnej materii. Jego rozwiązanie wymaga sięgania do różnych wariantów fizyki niestandardowej: modyfikacji teorii grawitacji (mechanika nie-Newtonowska, grawitacja kwantowa), materii ciemnych atomów, materii Kaluzy-Kleina, materii niebarionowej (ciężkie neutrino, neutrino sterylne), a także do cząstek generowanych w rozszerzeniach modelu standardowego (aksjony, słabo oddziałujące cząstki masywne, np. supersymetryczne). Wciąż jednak stałym niedomaganiem modelowania składu materii ciemnej jest „zderzenie” takich przewidywań z obserwacyjnymi ograniczeniami na gęstość ciemnej materii we Wszechświecie, w tym z szacowaną jej gęstością w centrach galaktyk. Obiecującego rozwiązania tych trudności dostarczają modele wieloskładnikowe, ze specjalnymi typami oddziaływań ciemna materia-materia barionowa, w tym z łamaniem izospinu.

Używane modele muszą uwzględniać także fakty obserwacyjne z obszaru fizyki cząstek, pochodzące z pomiarów wykonanych np. w CERN (LHC: eksperymenty ATLAS i CMS). Odwołując się do możliwych subtelnych efektów dedukowanych na podstawie danych eksperymentalnych, np. szerokości rozpadu bozonu Higgsa, można w sposób uzasadniony spekulować, że sektor skalarny modelu standardowego powinien być rozbudowany, co w konsekwencji oddziałuje na modelowe rozstrzygnięcia dotyczące składu ciemnej materii. I to jest kolejna motywacja badań podjętych przez Doktorantkę. Ich wyniki zaprezentowane w rozprawie wpisują się w pełni w ten zbiorowy wysiłek poszukiwania odpowiedzi na pytania o podstawowym znaczeniu dla naszego rozumienia ciemnej materii.

Treść rozprawy została podzielona na 8 rozdziałów. Rozdział pierwszy *Introduction* (4 strony), o nietypowej strukturze i układzie, właściwie hasłowo wprowadza podstawową terminologię i pojęcia odnoszące się do ciemnej materii i wybranych modeli niestandardowych (w sensie modelu standardowego), do oceny gęstości takiej materii w centrach galaktyk oraz (hipotetycznych) procesów prowadzących do „nad-łamania” parzystości CP. Zawarto tu — również niestandardowo — listę stosowanych skrótowców, co mogłoby stanowić istotne ułatwienie w czytaniu rozprawy, gdyby lista ta była bardziej kompletna, oraz listę kilku użytych symboli.

Rozdział drugi *Cosmology* (4 strony) zapoznaje czytającego z podstawowymi pojęciami i formalizmem matematycznym, używanymi do opisu izotropowego i jednorodnego Wszechświata oraz jego termodynamiki. Ma on charakter prawie leksykalny, co w pewnej mierze recenzent rozumie.

W rozdziale *Dark Matter* (21 stron) zostały sformułowane podstawowe pojęcia odnoszące się do ciemnej materii, łącznie z metodami obserwacyjnymi prowadzącymi do jej ewentualnej detekcji oraz do aktualnych ograniczeń na jej występowanie. Doktorantka kompetentnie i z dobrą znajomością tej dziedziny kosmologii omówiła przesłanki występowania ciemnej materii: od historycznie najstarszych sugestii pochodzących od Oorta i Zwicky'ego (niewidoczna materia), przez analizę krzywych rotacji galaktyk do obecnie używanego grawitacyjnego soczewkowania różnych rodzajów. Ten ogromny postęp w kosmologii obserwacyjnej pozwala na dokładną rekonstrukcję rozkładu materii ciemnej wewnątrz galaktyk i w obszarach międzygalaktycznych, oczywiście przy założeniu występowania takiej materii. W odróżnieniu od tych „ustaleń” wciąż brakuje bezpośredniej ewidencji występowania ciemnej materii w licznych i kosztownych eksperymentach laboratoryjnych. Autorka w rozdziale tym analizuje podstawowe propozycje teoretyczne grupujące się w dwa rozległe obszary badań: „menażerię” cząstek niestandardowych, pojawiających w konsekwencji najróżnorodniejszych rozszerzeń modelu standardowego, oraz konkurencyjnych modeli ze zmodyfikowaną teorią grawitacji. Na tym tle bada jednorodną ciemną materię [model 2HDMS, model $O(N=1)$] oraz materię wieloskładnikową [modele $O(N>1)$, 2CDMM], wskazując jednocześnie kontekst różnic między eksperymentami laboratoryjnymi a obserwacjami astronomicznymi. Należy podkreślić szczegółową specjalistyczną wiedzę oraz znajomość metod obliczeniowych, pozwalające Doktorantce swobodnie poruszać się w tej wymagającej problematyce oraz prezentować własne zaawansowane analizy związane z procesami termodynamicznymi (rozwiązania równań Boltzmanna, szczegółowe szacowanie wkładu poszczególnych rodzajów materii ciemnej) oraz wartościować stosowane modele, w tym naruszające symetrię izospinową.

Kolejny rozdział *$O(N)$ Singlet Scalar Dark Matter* (23 strony) poświęcony został wynikom badań odnoszących się do materii generowanej w najprostszym rozszerzeniu modelu standardowego o sektor skalarny, zawierający N singletów cechowania. Omawiane są tu ciekawe poznawczo konsekwencje możliwości istnienia materii tej postaci. Doktorantka dyskutuje różne ograniczenia nakładane pomiarami na parametry analizowanego modelu oraz ich implikacjami dla tzw. problemu skali występowania nowej fizyki (rzędu 1 TeV). Pokazuje jak dostrajając parametry (związane ze stabilnością próżni, unitarnością, charakterystykami potencjału skalarnego, brakiem biegunów Landaua poniżej skali Λ) można osiągnąć zgodność z ograniczeniami wynikającymi zarówno z obserwacyjnych jak i eksperymentalnych ograniczeń (gęstość ciemnej materii w centrach galaktyk, wkłady do szerokości połówkowej bozonu Higgsa od oddziaływań w stanach końcowych, procesy termalizacji w słabo oddziałującej ciemnej materii). Wyniki tu zaprezentowane są poznawczo ważne i wnoszą interesujące wątki do dyskusji nad składem materii ciemnej.

Rozdział *Two-Higs Doublet Model* (26 stron) dostarcza pełnego uzasadnienia dla ważności wyboru tytułowego modelu oraz znaczenia przeprowadzonych przez Doktorantkę badań w tym zakresie.

Wyniki eksperymentów ATLAS i CMS dla rozpadu bozonu Higgsa w kanale stanów końcowych $\gamma\gamma$, wskazujące na mocniejszy efekt niż wynikający z przewidywań modelu standardowego, inspiruje naturalne rozszerzenia, które mogą dostarczyć wyjaśnienia zaobserwowanego efektu. Pokazano tu w oparciu o przeprowadzone skanowania przestrzeni parametrów, uwzględniając ograniczenia implikowane pomiarami LEP dla rozpadów bozonów pośredniczących oraz kryteria teoretyczne (stabilność próżni, unitarność i perturbacyjność teorii), szczegółowe wyniki analizy dwu typów modelu 2HDM (różniących się wyborem sprzężeń z kwarkami i z leptonami). Wsnute wnioski wskazują, że ograniczenia wynikające z kryteriów teoretycznych znacznie redukują maksymalną wartość współczynnika rozgałęzienia $R_{gg}^h(\gamma\gamma)$. W modelu typu I wartości powyżej 1,3 są niedostępne, natomiast model typu II dopuszcza wartości 2-3 razy większe. Te ostatnie wartości wykluczają model na podstawie obserwacji niewielkiego tylko wzmocnienia dla sygnału ZZ oraz danych z fizyki mezonów powabnych.

W rozdziale *Two-Higgs Doublet Model with Scalar Singlet DM* (23 strony) Doktorantka przeanalizowała rozszerzenie modelu z poprzedniego rozdziału o dodatkową cząstkę skalarną (model 2HDMS), interesująco wzbogacając listę cząstek-kandydatów na ciemną materię z możliwym łamaniem parzystości CP. Model ten ma ciekawe właściwości znane z literatury, natomiast w rozprawie analizowano go pod kątem więzów narzucanych przez ostatnie wyniki LHC przy założeniu, że lekki bozon Higgsa jest jednoznacznie zarejestrowaną cząstką o masie 125 GeV. W tym przypadku nałożono podobne jak poprzednio ograniczenia teoretyczne (stabilność próżni, unitarność, globalne właściwości potencjału skalarnego) oraz eksperymentalne (ATLAS, CMS i konsekwencje rozpadu w kanale do stanów końcowych $\gamma\gamma$). Technicznie realizowano to odwołując się do wyboru zestawów parametrów „przeżywających” narzucone ograniczenia (analizy przeprowadzone w grupie J. Guniona), by następnie badać konsekwencje proponowanego rozszerzenia modelu o dodatkowe pole skalare: wpływ na rozpady w kanałach nieobserwowalnych, gęstość materii ciemnej oraz na warunki bezpośredniej jej detekcji.

Rozdział *Two-Component Dark Matter* (25 stron) zawiera badania odnoszące się do intensywnie dyskutowanej obecnie w literaturze koncepcji wieloskładnikowej materii ciemnej. Doktorantka podjęła to zagadnienie analizując model zawierający jak poprzednio pojedyncze pole skalare oraz dodatkowo nienaładowane pola typu Majorany. Oznaczało to w konsekwencji minimalny układ 3 nowych cząstek, singletów cechowania: cząstki skalarniej oraz dwu fermionów (model 2CDMM). W konkluzjach zaprezentowanych analiz stwierdza się, że w przypadku gdy masa fermionu Majorany jest większa od masy skalarnej, to wpływ neutrin na rozkład skalarniej ciemnej materii jest pomijalny. Przybliżone rozwiązania równania Boltzmanna w postaci jawnej umożliwiły dokładniejszą analizę: Doktorantka pokazała, że dla określonego wyboru parametrów pola fermionowe i skalare odprzegają się prawie równocześnie, a to w konsekwencji prowadzi do bogatej fizyki materii wieloskładnikowej, m.in. do interesującego wniosku, że w asymptotycznie chłodnej materii znormalizowana gęstość neutrin powinna dominować. Badania te umożliwiły zaproponowanie strategii postępowania przy bezpośredniej detekcji dwuskładnikowej materii ciemnej, zależnych od hierarchii mas, a także przedyskutować ograniczenia nakładane na badany model. Z wyników tu dyskutowanych trzeba również odnotować m.in. zgodność przewidywań przekroju czynnego σ_{DM-N} z wynikami eksperymentu LUX oraz — pomimo o rząd mniejszej wartości niż w eksperymencie XENON 100 — mas cząstki skalarniej mieszczących się wciąż

w dozwolonym reżimie. Udowodniono również, że zaproponowany model materii dwuskładnikowej może być kompatybilny z wynikami grup CREST-II i CDMS Si.

Rozprawę zamyka *Summary* (2 strony), podsumowanie opisujące najważniejsze zaprezentowane w niej wyniki, oraz Dodatki: **A Feynman Rules**; **B Annihilation Cross Sections**, **C Direct Detection Cross Section**. Te ostatnie udostępniają treści, które wspomagają czytelnika dodatkowymi definicjami, przyjętymi konwencjami, a także umożliwiają mu prześledzenie wyprowadzeń używanych w głównym tekście formuł na przekroje czynne.

II. Ocena rozprawy

Rozprawa liczy 160 stron i została podzielona na, jak zaznaczyłem wyżej, 8 rozdziałów. Zawiera przedmowę oraz spis cytowanych źródeł, złożony ze 159 pozycji literaturowych, w tym odniesienia do 7 artykułów i preprintów, których współautorką była p. A. Drozd. Dobór źródeł nie nasuwa zastrzeżeń, chociaż prowokuje drobne uwagi natury redakcyjnej (niekompletne dane bibliograficzne, np. pozycja 159) oraz zdziwienie potraktowaniem bibliografii jako dodatku (Appendix D: Bibliography), co zwyczajowo i merytorycznie jest nieuzasadnione. W rozprawie zamieszczono 73 oryginalne rysunki, świetnie wspierające tok wyjaśnień, oraz 15 tabel prezentujących wyniki badań.

Rozprawa jest napisana solidnie po angielsku, zaś znajomość złożonego słownictwa specjalistycznego, zarówno z zakresu astrofizyki oraz kosmologii, jak też fizyki cząstek i teorii pola, nie budzi zastrzeżeń. Jej redakcja, kompletność tez i ich logiczne powiązanie, a także sposób wykładu nie nasuwają uwag krytycznych i świadczą jednoznacznie o dobrym opanowaniu przez Doktorantkę warsztatu pisania prac badawczych. Dla kompletności opinii w tej części należy jednak zwrócić uwagę na drobne usterki redakcyjne: rozdziały zaczynają się nie zawsze na stronach nieparzystych, występują bękarty, wzory są traktowane niekonsekwentnie jako elementy składowe zdań, w których występują, oraz tzw. literówki. Wynikły one być może z dającego się odczuć pośpiechu prac redakcyjnych. Szczegółowy spis tych zastrzeżeń dostarczam Autorce oddzielnie. Jednocześnie pragnę podkreślić, że w żadnej mierze nie umniejszają one mojego dobrego zdania o jej umiejętnościach posługiwania się edytorem TEX, podstawowym narzędziem pisania prac naukowych z fizyki i poprawnego redagowania tych prac.

Merytorycznie rozprawa doktorska p. Aleksandry Drozd zasługuje na wysoką ocenę. Jej tematyka jest aktualna i ważna poznawczo, zaś przeprowadzone badania i uzyskane wyniki oryginalne. Do istotnych osiągnięć w mojej opinii należą:

1. Przebadanie właściwości rozszerzeń skalarnych modelu standardowego w postaci modelu $O(N)$ oraz modelu 2HDM z singletowym polem skalarnym, a także modelu dwuskładnikowej ciemnej materii 2CDMM.
2. Zbadanie konsekwencji ograniczeń teoretycznych i obserwacyjno-eksperymentalnych, wyznaczających spójny obszar parametrów fizycznych, akceptowalnych z punktu widzenia obu zakresów zjawisk fizycznych (fizyka cząstek, kosmologia obserwacyjna). Szczególnie wartościowe jest uwzględnienie w tych analizach ostatnich wyników LHC, dotyczących

możliwego wzmocnienia sygnału gamma-gamma w pobliżu energii 125 GeV (typ I i typ II modelu 2HDM).

3. Zaobserwowanie znacznego łamania izospinu w oddziaływaniu ciemnej materii z jądrami atomowymi, co umożliwi spójną interpretację wyników grup LUX i CDMS Si.
4. Przebadanie modelu dwuskładnikowej ciemnej materii, zawierającego cząstki skalarne i fermiony Majorany, oraz pokazanie, że uzgodnienie z ograniczeniami astrofizycznymi i laboratoryjnymi wymaga, by masa cząstki skalarnej wynosiła około 62,5 GeV, zaś neutrino (fermion Majorany) było niewiele lżejsze.

Osiągnięte wyniki świadczą jednocześnie o dojrzałości naukowej Doktorantki, swobodnie wykorzystującej skomplikowaną i trudną pojęciowo problematykę fizyki niestandardowej. Wskazują również, że opanowała ona wyrafinowane metody teorii pola i teorii cząstek elementarnych, a także potrafi skutecznie realizować zawansowane rachunki oraz z dużą biegłością stosować techniki numeryczne, niezbędne w skomplikowanych analizach wpływu ograniczeń obserwacyjno-laboratoryjnych na fizyczną zawartość diskutowanych modeli. Starannie przygotowane rysunki wskazują natomiast na równie biegłe opanowanie graficznych technik prezentacji wyników badań.

W świetle powyższych stwierdzeń przedstawiona mi do oceny rozprawa doktorska ma jednoznacznie charakter oryginalnego rozwiązania postawionego problemu naukowego. Równocześnie wskazuje na obszerną, dobrze ugruntowaną i stosowaną w realizowanych badaniach wiedzę teoretyczną z fizyki i jej metod, wykorzystanych efektywnie w zaprezentowanych w rozprawie wynikach przeprowadzonych badań naukowych.

Ponadto, opublikowane wyniki badań w specjalistycznych czasopismach powszechnie cenionych w środowisku fizyków oddziaływań fundamentalnych i wysokich energii (7 prac i preprintów) potwierdzają bezdyskusyjne umiejętności badawcze p. Aleksandry Drozd i świadczą, że jest ona młodą badaczką o dużym potencjale twórczym i uznanych już osiągnięciach.

Powyższe stwierdzenia uprawniają recenzenta również do postawienia wniosku o wyróżnienie rozprawy p. Aleksandry Drozd.

III. Konkluzja

Przedstawiona do oceny rozprawa p. Aleksandry Drozd zatytułowana *Multi-Component Dark Matter and Extensions of the Standard Model Scalar Sector* **spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, określone w jej § 13 ust. 1, ust 2 i ust. 6.**

Wnoszę o dopuszczenie Doktorantki do dalszych czynności przewodu doktorskiego.

Lublin, 28 listopada 2014 roku.

