



# UNIwersytet Warszawski

## Wydział Fizyki

dr hab. Krzysztof Turzyński, prof. ucz.

Warszawa 04.05.2022 r.

### Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr. Krzysztofa Jodłowskiego

***pt. Dark matter as a laboratory for new ideas in physics beyond the Standard Model***

#### **Forma rozprawy**

Rozprawa doktorska mgr. Jodłowskiego składa się z dziewięciu rozdziałów, poprzedzonych listą publikacji, na których rozprawa jest oparta, listą rycin, listą tabel oraz listą skrótów i akronimów. Rozprawa zawiera także pięć dodatków. Rozdział 1 stanowi krótkie wprowadzenie do rozprawy, rozdziały 2 i 3 zawierają bardziej rozbudowane wprowadzenie opisujące standardowy model kosmologiczny i zagadnienie ciemnej materii, a także termiczną historię Wszechświata w kontekście wytworzenia występującej obecnie ciemnej materii. Zasadnicze tezy rozprawy doktorskiej, zawarte w opublikowanych przez mgr. Jodłowskiego pracach, stanowią treść rozdziałów 4-8, przy czym bardziej skomplikowane wyniki, których dokładne zacytowanie utrudniałoby śledzenie struktury logicznej tekstu są umieszczone w dodatkach B-E. Rozdział 9 jest podsumowaniem rozprawy, zaś dodatek A zawiera bardziej techniczne i skomplikowane elementy doprecyzowujące treść rozdziałów wstępnych. Bibliografia pracy jest niezmiernie rozbudowana i liczy 592 pozycje.

#### **Podsumowanie kryteriów formalnych dla rozprawy doktorskiej**

Kryteria formalne, jakie powinny być stosowane przy ocenie rozprawy doktorskiej określone są w Ustawie prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 roku z późniejszymi zmianami. Wedle cytowanego aktu rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Przedmiotem rozprawy doktorskiej może być w szczególności oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

#### **Ocena merytoryczna rozprawy**

Tytuł rozprawy jest bardzo ogólny i stanowi szczególny przykład nowomowy połączonej ze specjalistycznym żargonem. Jasne jest, że tytuł rozprawy miał być w zamierzeniu mgr. Jodłowskiego przenośnią unifikującą poszczególne zadania badawcze opisane w pracy, jednak sformułowanie *Dark matter as a laboratory...* należy uznać za niefortunne. Taka unifikacja na poziomie tytułu rozprawy była zresztą zabiegiem koniecznym, gdyż same wyniki naukowe mgr. Jodłowskiego opisane w rozprawie usystematyzowane są raczej według projektów badawczych, w jakie mgr Jodłowski był zaangażowany i które zakończyły się publikacjami naukowymi, niż według

tematyki osiągnięć naukowych. Same rozdziały 4-7 przypominają raczej niezależne publikacje naukowe niż części rozprawy doktorskiej powiązane wspólną tematyką. Takie sposób przedstawienia treści uwypukla wprawdzie fakt, że mgr Jodłowski przedstawił w rozprawie oryginalne rozwiązanie nie jednego a kilku problemów naukowych, ale równocześnie przeszkadza mgr. Jodłowskiemu w wykazaniu się ogólną wiedzą teoretyczną.

W rozdziałach 2 i 3 przedstawiono elementy wstępu teoretycznego do rozprawy, tj. przedyskutowano standardowy model kosmologiczny i zagadnienie ciemnej materii.

O ile zawartość tych rozdziałów nie budzi zastrzeżeń, dużo bardziej istotne jest to, czego we wstępie teoretycznym nie ma. Skoro bowiem problem ciemnej materii jest jedną z kilku przesłanek skłaniających teoretyków do prób budowania modeli rozszerzających Model Standardowy cząstek elementarnych, warto było omówić pozostałe przesłanki, ogólne strategie budowania takich modeli oraz możliwości weryfikacji takich modeli w istniejących i planowanych projektach doświadczalnych. Pozwoliłoby to na unifikację koncepcyjną wyników analiz przedstawionych w rozprawie i dowiodło ogólnej wiedzy teoretycznej mgr. Jodłowskiego. Bez tego wybór konkretnych badań przedstawionych w rozprawie wydaje się nieco przypadkowy. Jest to o tyle zaskakujące, że wszystkie zagadnienia przedstawione w rozprawie doktorskiej mgr. Jodłowskiego wpisują się w czytelny, ambitny i realizowany konsekwentnie od wielu lat program badawczy promotora, prof. dr. hab. Leszka Roszkowskiego.

W rozdziale 4 przedstawiono analizę możliwości odkrycia lekkich cząstek spoza Modelu Standardowego w przygotowywanych i projektowanych detektorach przy akceleratorze LHC pozwalających na rejestrację cząstek produkowanych wzdłuż osi wiązek proton-proton, ale w dużej odległości od miejsca zderzenia wiązek. Stwierdzono, że detektory takie jak FASER, MATUSHLA i SHiP mają większy, niż do tej pory sądzono, potencjał odkrycia nowych, lekkich (tj. o masach rzędu GeV i mniejszych) cząstek spoza Modelu Standardowego. Oryginalnym wkładem mgr. Jodłowskiego, pracującego pod kierunkiem promotora i promotora pomocniczego, było zauważenie, że cząstkami możliwymi do zarejestrowania przez detektory są nie tylko produkty rozpadów lekkich cząstek pierwotnie produkowane w zderzeniach proton-proton, ale także produkty rozpadów cząstek, na które rozpadły się takie cząstki. Uwzględnienie takiej „wtórnej” produkcji cząstek poszerza zakres parametrów modeli „nowej fizyki”, takich jak tzw. portal wektorowy, portal skalarny czy portal neutrinowy, dla których możliwe jest zaobserwowanie charakterystycznych dla tych modeli charakterystyk znanych cząstek rejestrowanych przez detektory. Ten wkład jest bardzo ważny z powodu, który jest chyba niedostatecznie mocno podkreślony w rozprawie (por. np. zakończenie podrozdziału 4.4.1.1). Uwzględnienie produkcji wtórnej nie jest ledwie poprawką do produkcji pierwotnej i jedynie łączne uwzględnienie wszystkich rozpadów, których produkty są rejestrowane przez detektor, pozwala jednoznacznie wnioskować o odkryciu efektów nowej fizyki spoza Modelu Standardowego i ich prawidłowej interpretacji. Innymi słowy, to wkład mgr. Jodłowskiego zapewnia poprawną interpretację wyników uzyskiwanych w tych detektorach dla rozważanych modeli.

Niezależnie od dużej wagi naukowej zawartych w rozdziale 4 wyników, ich przedstawienie jest stosunkowo skrótowe i hermetyczne. Nie ulega wątpliwości, że mgr Jodłowski doskonale opanował arkana sztuki obliczania widm cząstek rejestrowanych w detektorach, jednak w rozprawie doktorskiej wiele szczegółów nie tylko pozostaje bez opisu, ale nawet jakiegokolwiek wzmianki. Liczne są za to odniesienia do literatury zastępujące opis zastosowanych metod. Najbardziej jaskrawy przykład takiej praktyki stanowi drugi akapit podrozdziału 4.4:

*All the models we study are constrained by various observations [...] An exhaustive discussion of all relevant constraints can be found, e.g., in [234,322] and references therein.*

Stwierdzenie to stanowi w zasadzie całość dyskusji ograniczeń eksperymentalnych na rozważane w rozdziale 4 modele, choć można było oczekiwać choćby krótkiej charakterystyki tych ograniczeń. Inny przykład można znaleźć w podrozdziale 4.4.1.3:

*...we used a conservative approach to exclude all the secondary processes occurring in the SHiP detector closer than  $\sim 2.5$  m away from the decay vessel, as described in Section 4.3.2.1.*

Tymczasem w podrozdziale, do którego prowadzi to odniesienie, można znaleźć jedynie odesłanie do pracy [321], gdzie opisywane jest wzmiankowane cięcie. Ilustruje to główną wadę rozprawy doktorskiej mgr. Jodłowskiego, która napisana jest w sposób właściwy raczej dla publikacji naukowych i nie rozwija wątków metodologicznych innych niż te wprowadzane przez autora w pracy. Tłumi to w pewnym stopniu wykazywanie się przez mgr. Jodłowskiego ogólną wiedzą teoretyczną, wymagane przez przepisy prawa.

Rozdział 5 poświęcony jest zagadnieniom podobnym do opisywanych w rozdziale 4, tj. wtórnej produkcji w LHC długożyciowych, lekkich cząstek i ich możliwej detekcji. Różnice polegają na oddziaływaniach badanych cząstek, którym można przypisać (naruszoną) liczbę leptonową. W rozprawie badana jest możliwość zarejestrowania w projektowanych detektorach FASER2 i FASERv2 charakterystycznego sygnału w postaci wysokoenergetycznych, przeciwnie naładowanych par cząstek lub kaskad elektromagnetycznych. Do analizy wybrano dwa modele teoretyczne: portal neutrinowy z dipolowym sprzężeniem do oddziaływań elektromagnetycznych oraz portal wykorzystujący nowe bozony cechowania, bardzo słabo sprzęgające się do oddziaływań elektromagnetycznych. Dla pierwszej z tych klas modeli wykazano, że najistotniejszy będzie sygnał pochodzący od kaskad elektromagnetycznych wywołanych przez fotony będące produktami rozpadu nowych cząstek, aczkolwiek tylko niewielki zakres przestrzeni parametrów nie jest obecnie wykluczony na podstawie istniejących danych. Stwierdzono także komplementarną rolę detektorów FASER2 i FASERv2 w tym zakresie. Dużo bardziej obiecująco przedstawia się możliwość zarejestrowania sygnału w drugiej z tych klas za pomocą detektora FASER2. Wniosek ten był możliwy dzięki starannej analizie widma par elektron-pozyton pochodzących z pierwotnej i wtórnej produkcji nowych bozonów cechowania oraz uwzględnieniu rozpraszania neutrin na elektronach w detektorze.

Należy podkreślić, że analizy przeprowadzono bardzo starannie, uwzględniając szeroki zakres istniejących ograniczeń doświadczalnych. Na uwagę zasługuje także przejrzysty sposób opisanie fizycznego aspektu prowadzonych badań. Niedosyt budzą wszakże bardzo ogólne konkluzje tego rozdziału oraz, sygnalizowany wcześniej, brak zakorzenienia opisywanych wyników w schemacie teoretycznym budowania rozszerzeń Modelu Standardowego cząstek elementarnych.

Treść rozdziałów 4 i 5 wykazuje niewiele wspólnego z tytułową ciemną materią. Prawdą jest, że konkretne modele fizyki cząstek elementarnych stanowiące rozszerzenie względem Modelu Standardowego są motywowane próbami wyjaśnienia pochodzenia ciemnej materii we Wszechświecie, jednak przestrzeń parametrów istotnych dla opisywanych w tych rozdziałach badań jest niezależna od konkretnej gęstości ciemnej materii we Wszechświecie. W tym sensie rozdziały te należy uznać za – udaną! – próbę analizy fenomenologicznej modeli z lekkimi cząstkami długożyciowymi z punktu widzenia możliwości zarejestrowania sygnału pochodzącego od takich cząstek w zaprojektowanych pod tym kątem detektorach. Warto podkreślić, że promotor pomocniczy, dr Sebastian Trojanowski, jest światowej klasy ekspertem w zakresie tych zagadnień, nie dziwi zatem, że wyniki zaprezentowane przez mgr. Jodłowskiego w rozprawie doktorskiej istotnie poszerzają wiedzę na temat użyteczności opisywanych detektorów.

Rozdział 6 przynosi zasadniczy zwrot tematyki rozprawy doktorskiej w stronę ciemnej materii. Zaprezentowano w nim globalną analizę minimalnego supersymetrycznego rozszerzenia Modelu Standardowego cząstek elementarnych. Zasadniczym celem tej analizy było zbadanie możliwości wykrycia w Cherenkov Telescope Array kaskad elektromagnetycznych wywoływanych anihilacją cząstek ciemnej materii w gęstych obszarach naszej Galaktyki przy założeniu, że cząstkami tymi są neutralina – supersymetryczny partnerzy bozonów cechowania oddziaływań elektroślabych oraz pól Higgsa.

Analiza przedstawiona w rozdziale 6 rozprawy doktorskiej mgr. Jodłowskiego stanowi kolejny krok w prowadzonych od lat badaniach, których inicjatorem i organizatorem jest promotor, prof. dr hab. Leszek Roszkowski. Jej atutem jest włączenie do skanu przestrzeni parametrów nowych rozwiązań technicznych i fizycznych, co jest niezbędne, aby w wiarygodny sposób oszacować możliwość zaobserwowania sygnału pochodzącego z anihilacji cząstek ciemnej materii, a tym samym pośredniego odkrycia ciemnej materii.

Dyskusyjnym pomysłem wydaje się włączenie do rozdziału 6 swoistego wprowadzenia teoretycznego, którego celem jest przedstawienie minimalnego supersymetrycznego rozszerzenia Modelu Standardowego cząstek elementarnych (podrozdział 6.2) oraz neutralina jako kandydata na cząstkę ciemnej materii (podrozdział 6.3). Jak zostało to już odnotowane wyżej, klasyczna konstrukcja rozprawy doktorskiej nakazywałaby przeniesienie przynajmniej części treści tych podrozdziałów do wprowadzenia teoretycznego do pracy. Słowa komentarza wymaga też Dodatek D, który w zamyśle mgr. Jodłowskiego ma uzupełniać rozdział 6. Wzory i rozważania przedstawione w Dodatku D nie mają bezpośredniego związku z żadnym elementem pracy, wydają się przeto

bezużyteczne dla wyników przedstawionych w pracy. Z drugiej strony, w bardzo zdawkowy sposób potraktowano w rozdziale 6 kwestie teoretyczne ważne dla interpretacji uzyskanych wyników, takie jak oddziaływania cząstek supersymetrycznych prowadzące do właściwej gęstości reliktovej ciemnej materii dla odpowiednich zakresów mas, dynamikę koanhilacji czy wzmocnienie Sommerfelda.

Osobnego komentarza wymaga kończący podrozdział 6.6 akapit, który wart jest przytoczenia w całości:

**Other constraints.** *In addition to the relic density, we use the latest data coming from complementary experimental searches: (i) DM DD, (ii) collider constraints, (iii) Higgs boson and flavor physics, and (iv) DM ID. They have ruled out much of the parameter space, especially thanks to the tremendous progress in DD searches, and the fact that the Higgs boson mass is not much larger than the Z boson mass. See [1] for details.*

Takie podsumowanie metodyki prowadzonych badań, polegające na odesłaniu do literatury (w tym przypadku do pracy, której wyniki są włączone w rozprawę doktorską, od której oczekuje się przecież starannego przedstawienia przyjętych założeń!) zamiast choćby krótkiego omówienia problemu jest, jak już zauważono, typowe dla stylu rozprawy doktorskiej mgr. Jodłowskiego. Jednak w cytowanym fragmencie zabieg taki skutkuje całkowitym pominięciem omówienia założenia, które w kluczowy sposób wpływa na prezentowane w rozdziale 6 wyniki, tj. nieuwzględnienia wyników doświadczalnych dla anomalnego momentu magnetyczny mionu. Dlatego należy uznać brak dyskusji wspomnianych ograniczeń za poważny mankament teoretyczny pracy<sup>1</sup>.

W rozdziale 7 mgr Jodłowski powraca do zagadnienia fenomenologii długożyciowych cząstek lekkich, dyskutowanego już wcześniej w rozdziałach 4 i 5. Jednak w odróżnieniu od poprzednich części rozprawy, w rozdziale 7 dyskutowany jest znacznie bardziej kompletny model teoretyczny uogólniający Model Standardowy cząstek elementarnych. Zawiera on prócz kandydata na cząstkę ciemnej materii cały szereg innych stanów i ich oddziaływań, przy czym masy proponowanych cząstek obejmują kilkanaście rzędów wielkości. Tym samym badania przedstawione w rozdziale 7 w najpełniejszy sposób realizują zadanie badawcze postawione w tytule rozprawy doktorskiej.

Model przedstawiony w rozdziale 7 jest stosunkowo rozbudowany, zawiera jednak wyłącznie elementy znane z Modelu Standardowego cząstek elementarnych, zatem należy go uznać za uzasadniony teoretycznie. Cząstki Modelu Standardowego oddziałują z nowo proponowanymi cząstkami za pośrednictwem portalu Higgsa, jakkolwiek sygnalizowana jest możliwość kinetycznego mieszania fotonów z nowymi bozonami cechowania. Zaletą pracy w takim dobrze zdefiniowanym modelu jest w pierwszej kolejności możliwość ukonkretnienia idei obecnej już od kilku lat w literaturze, polegające na możliwości detekcji kaskad elektromagnetycznych generowanych przez długo żyjące produkty anihilacji cząstek ciemnej materii. W odróżnieniu od typowo rozważanych

---

<sup>1</sup> Autor niniejszej recenzji jest świadomy, że założenie takie jest dyskusyjne, zwłaszcza że sam je onegdaj stosował we wspólnej publikacji z prof. dr. hab. Leszkiem Roszkowskim i dr. Sebastianem Trojanowskim.

modeli, traci się tu jednoznaczne powiązanie między obszarami o zwiększonej gęstości ciemnej materii, co sprzyja efektywnej anihilacji, a źródłami promieniowania elektromagnetycznego, o ile wytwarzane w anihilacji cząstki są w stanie przemierzyć przed swoim rozpadem odległości w skali kosmologicznej.

Dużą wartością wyników przedstawionych w rozdziale 7 jest systematyczne uwzględnienie ograniczeń fenomenologicznych. Wobec sporej rozpiętości mas cząstek i złożoności całego modelu lista wyników, które należy włączyć do analizy jest stosunkowo długa: od danych akceleratorowych, przez ograniczenia astrofizyczne (chłodzenie supernowych przez emisję lekkich cząstek) do kosmologicznych (wpływ lekkich cząstek na pierwotną nukleosyntezę i zaburzenia widma mikrofalowego promieniowania tła przez rozpady długo żyjących cząstek). Jak już zaznaczono wcześniej, często sposób uwzględnienia takich wyników przez mgr. Jodłowskiego jest trudny do odtworzenia przez czytelnika rozprawy doktorskiej, np. drugi akapit podrozdziału 7.6.1 opisuje odpowiednią procedurę w następujący sposób:

*We implement them [bound on metastable relic abundance – KT] in accordance with [492] for the BBN constraints and [102] for the CMB bounds derived from the combined data from the Planck [18] and COBE/FIRAS [64] experiments where we follow [102,493,494].*

Wyniki przedstawione w rozdziale 7 są istotne z tego względu, że pozwalają – na przykładzie modelu wykraczającego poza najbardziej uproszczone propozycje teoretyczne – na dyskusję komplementarności różnych strategii poszukiwania „nowej fizyki”. Duża część prezentowanej w rozprawie doktorskiej przestrzeni parametrów modelu, zgodna z obecnymi danymi doświadczalnymi, może dać mierzalny sygnał zarówno w obecnych i projektowanych eksperymentach akceleratorowych, takich jak FASER, MATUSHLA i SHiP, o których była już tu mowa, jak i pośredniej detekcji ciemnej materii za pomocą Cherenkov Telescope Array. Należy jednak mieć na uwadze, że istnieją wybory parametrów, dla których optymalne są inne, omawiane w rozprawie, metody detekcji sygnału. Niestety, nie cała dyskusja w drugiej części podrozdziału 7.7 jest łatwa do śledzenia, można bowiem sądzić, że na skutek omyłki w rozprawie nie zamieszczono prawego panelu Ryciny 7.7, gdyż są do niego odniesienia zarówno w tekście rozprawy, jak i w podpisie.

Rozdział 8 rozprawy doktorskiej mgr. Jodłowskiego otwiera kolejną nową tematykę badawczą. Zasadniczą analizą tego rozdziału jest badanie nieminimalnego rozszerzenia Modelu Standardowego z rozbudowanym sektorem cząstek oddziałujących z cząstkami Modelu Standardowego za pośrednictwem portalu skalarnego<sup>2</sup>. Motywacja wprowadzenia tego modelu jest dwójaka: po pierwsze, przewiduje on kandydata na cząstkę ciemnej materii i, po drugie, dodatkowe

---

<sup>2</sup> Można dostrzec drobną niezgodność terminologiczną między podrozdziałem 8.4 i podrozdziałem 4.1.1 rozprawy, gdyż oddziaływania tego samego typu nazywa się raz portalem Higgsa, jak we wzorze (8.4.3), a raz portalem skalarnym, jak we wzorze (4.1.3).

oddziaływania w nowym sektorze sprawiają, że cząstki ciemnej materii oddziałują względnie silnie, tzn. mają duży przekrój czynny na rozpraszanie, znacznie większy niż dla standardowo rozważanych cząstek ciemnej materii, które biorą udział jedynie w oddziaływaniach słabych. Pozwala to na uniknięcie centralnych osobliwości w galaktycznych halo ciemnej materii, jakie przewidywane są przez symulacje numeryczne, ale których występowanie nie byłoby zgodne z obserwacjami. Zasadniczym kontekstem do tych analiz jest występowanie pewnych niezgodności w standardowym modelu kosmologicznym. Po pierwsze, wartość stałej Hubble'a wyznaczona pośrednio z dopasowania modelu do widma mikrofalowego promieniowania tła różni się od tej wyznaczonej bezpośrednio z pomiaru relacji odległość-przesunięcie ku czerwieni. Problem ten jest obecnie bardzo aktywnie badany zarówno przez fizyków, jak i przez astronomów. Po drugie, istnieje szereg drobniejszych niezgodności w pomiarach i obserwacjach (wyznaczanie wartości parametru  $\sigma_8$ , powstawanie supermasywnych czarnych dziur, anomalia widma energii odrzutu elektronów w XENON1T), które same w sobie nie byłyby zapewne pojedynczo przedmiotem uwagi fizyków, ale mogą stanowić razem pewne wskazówki co do kierunku rozszerzania Modelu Standardowego.

W takim kontekście analizowana jest w rozdziale 8 termiczna historia Wszechświata, w której cząstki ciemnej materii nie są produkowane w wyniku odprężania, jak ma to miejsce w typowych modelach termicznej ciemnej materii, ale w sposób wtórny, w wyniku rozpadu długożyciowej, lekkiej cząstki biorącej udział w oddziaływaniach portalu, która powstała w standardowy sposób, w wyniku odprężania. Dowolność wyboru parametrów modelu pozwala rozważać sytuacje, w których cząstka ta rozpada się w różnych okresach ewolucji Wszechświata, wpływając na przynajmniej niektóre z opisanych wyżej niezgodności. Analiza przedstawiona w rozdziale 8 polega na globalnym skanie rozważanego modelu z uwzględnieniem ograniczeń kosmologicznych. Zasadniczym wynikiem tej analizy jest wskazanie parametrów modelu, które są zgodne z tymi ograniczeniami, a jednocześnie pozwalają na zwiększenie przekroju czynnego na rozpraszanie cząstek ciemnej materii i modyfikację rozkładu gęstości ciemnej materii w halo galaktycznym względem typowo rozważanych modeli.

Zwraca uwagę powściągliwość mgr. Jodłowskiego w czytelnym formułowaniu konkluzji dotyczących tego, jak dalece przedstawiony w rozdziale 8 model pozwala na usunięcie niezgodności między pośrednimi i bezpośrednimi metodami wyznaczania parametru Hubble'a. Przeprowadzone naprędce przez autora niniejszej recenzji obliczenia zakładające gaussowski charakter niepewności wyznaczenia wszystkich wielkości wskazują na to, że zaproponowany mechanizm pozwala na zmniejszenie poziomu niezgodności z 3,8 do 3 odchyleń standardowych. W tym zakresie oryginalna praca mgr. Jodłowskiego przygotowana razem z dr. Andrzejem Hryczukiem jest dużo bardziej rzeczowa, gdyż określa uzyskany efekt jako *relatively mild*. Dla porządku należy dodać, mgr Jodłowski być może także odniósł się do tego wyniku na stronie 114 rozprawy doktorskiej, pisząc:

*As it was understood after our initial study [...] had been published, a decaying dark matter (DCDM) solution similar to the one described below, would not only decrease the sound horizon of the last scattering – which increases  $H_0$  (as desired) – but the amount needed to fully resolve these tensions would also severely decrease the photon diffusion damping scale, leading to unacceptably worse fit to large  $l$  part of the CMB spectrum.*

Wobec skomplikowanej struktury tego zdania trudno definitywnie orzec, co autor miał na myśli, zwłaszcza że uwaga ta znajduje się w pracy w podrozdziale 8.2, a więc przed dyskusją wyników przedstawionych w podrozdziale 8.6.

### **Inne uwagi**

Na szczególne podkreślenie zasługuje doskonałe opracowanie redakcyjne i edytorskie rozprawy doktorskiej. Pomimo bardzo dużej gęstości specjalistycznej terminologii oraz ewidentnej predylekcji mgr. Jodłowskiego do skrótowców i akronimów, język rozprawy jest przejrzysty i nie utrudnia podążania za fizycznymi aspektami rozumowania. Jest to tym większe osiągnięcie, że rozprawa doktorska jest napisana w języku angielskim. Minimalna liczba literówek i błędów edytorskich jest zdecydowanie bardzo dobrą stroną tej rozprawy.

### **Podsumowanie**

Przedstawiona rozprawa doktorska zawiera wiele ważnych wyników dotyczących fenomenologicznych aspektów teorii oddziaływań fundamentalnych wykraczających poza Model Standardowy cząstek elementarnych. Dowodzi to, że mgr Krzysztof Jodłowski jest dojrzałym naukowcem, potrafiącym rozwiązywać problemy badawcze w wielu obszarach badawczych współczesnej fizyki teoretycznej – od fizykę akceleratorów po fizykę wczesnego Wszechświata. Ta wieloaspektowość badań mgr. Jodłowskiego z jednej strony wskazuje na to, że mgr Jodłowski jest fizykiem gruntownie wykształconym i w pewnym sensie „uniwersalnym”, tzn. gotowym do podjęcia jednej z wielu tematów badawczych obecnych w wiodących grupach badawczych na całym świecie, jednak z drugiej strony powoduje nadmierne rozdrobnienie materiału rozprawy doktorskiej – ze szkodą dla aspektu ściśle teoretycznego, o czym była mowa przy omawianiu treści pracy.

Przedstawione w recenzji uwagi krytyczne, choć zajmują sporo miejsca, nie wpływają jednak na moją **jednoznacznie pozytywną ocenę rozprawy doktorskiej mgr. Jodłowskiego**.

Wyszczególnione w pracy osiągnięcia naukowe z dużym naddatkiem spełniają wymagania stawiane rozprawom doktorskim, a zaprezentowana w pracy ogólna wiedza teoretyczna odpowiada poziomowi i zakresowi wymaganemu od kandydatów do stopnia naukowego doktora. Dlatego z całym przekonaniem rekomenduję dopuszczenie mgr. Krzysztofa Jodłowskiego do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora nauk fizycznych, w tym do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.