



Warszawa 14.08.2023

Prof. dr hab. Marek Biesiada
Narodowe Centrum Badań Jądrowych
Pasteura 7
02-093 Warszawa

***Ocena rozprawy doktorskiej mgr Anny Sochy pt.
„Role of gravitational interactions during reheating and dark matter
production”***

W swej rozprawie doktorskiej Pani Anna Socha przedstawiła oryginalne wyniki badań dotyczących fizyki bardzo wczesnego wszechświata tzn. epoki inflacji i następującej po niej epoki rozgrzania, a w szczególności mechanizmów kreacji cząstek Modelu Standardowego i ciemnej materii oraz relikтового tła pierwotnych fal grawitacyjnych. Tematyka rozprawy jest niezwykle aktualna. Problem ciemnej materii już od prawie stu lat pozostaje nierozwiązaną zagadką fizyki. Eksperymenty podziemne takie jak CRESST czy XENON, pomimo stałego zwiększania ich czułości nie rejestrują jeszcze oddziaływań ciemnej materii ze znanymi cząstkami. Podobnie, w LHC nie znaleziono odwodów na fizykę poza Modelem Standardowym przewidywaną w najprostszych supersymetrycznych rozszerzeniach Modelu Standardowego. Dlatego też, omawiane w rozprawie oryginalne propozycje cząstek ciemnej materii oddziałujących jedynie grawitacyjnie z resztą świata mają kapitalne znaczenie. Podobnie nowo powstała astrofizyka fal grawitacyjnych obejmująca nie tylko detektory LIGO-Virgo-KAGRA, lecz także obserwacje polaryzacji promieniowania mikrofalowego tła (BICEP, Keck) oraz techniki chronometrażu pulsarów (np. sieć NANOGrav) z pewnością doprowadzi w przyszłości do odkrycia i badania tła pierwotnych fal grawitacyjnych. Wyniki opisane w rozprawie dostarczają teoretycznych przewidywań w tym zakresie.

Przedstawiona mi do oceny rozprawa jest napisana w języku angielskim, obejmuje siedem rozdziałów poprzedzonych streszczeniem w języku angielskim i polskim, podziękowaniem, spisem dorobku publikacyjnego autorki oraz spisami: treści, rysunków, tabel i stosowanych skrótów. Rozprawę kończą cztery dodatki (Appendix A-D) oraz spis literatury. Z opisu dorobku można się dowiedzieć, że Pani mgr Socha jest współautorką 4 oryginalnych artykułów opublikowanych w renomowanych czasopismach: *Journal of High Energy Physics* oraz *Physics Letters B*, także współautorką 2 prac pokonferencyjnych.

Rozdział 1 jest rozdziałem wstępnym. Autorka opisuje w nim istotę problemu ciemnej materii i podsumowuje naszą obecną wiedzę na ten temat. Prezentując historię zagadnienia, cofa się do XVII wieku przypominając przewidywania Johna Michell’a i Pierre’a Simona de Laplace’a dotyczące możliwości istnienia „ciemnych gwiazd” – obiektów obecnie znanych jako czarne dziury. Oczywiście centralnym punktem rysu historycznego są wizjonerskie i



przełomowe prace Fritza Zwicky'ego z lat 30-tych i Very Rubin z lat 70-tych XX wieku. Nie zapomina przy tym wspomnieć o, często niezauważanym, wkładzie Jana Oorta. Następnie w sposób bardzo przystępny, dość wyczerpująco opisuje cały wachlarz obecnych przesłanek wskazujących na istnienie ciemnej materii: analiza promieniowania mikrofalowego tła, testy nukleosyntezy pierwotnej w oparciu o zawartość pierwiastków lekkich, rozkład struktur wielkoskalowych, soczewkowanie grawitacyjne. Opis ten ma duży walor edukacyjny, gdyż wiem z doświadczenia, że nawet niektórzy fizycy wciąż mają skłonność do płytkiego sprowadzania obserwacyjnych dowodów istnienia ciemnej materii jedynie do płaskich krzywych rotacji galaktyk spiralnych. Po tym wprowadzeniu następuje wyczerpujący przegląd istniejących poglądów dotyczących natury ciemnej materii. Centralne miejsce opisu zajmują cząstki elementarne spoza Modelu Standardowego, chociaż alternatywni kandydaci: MACHO, pierwotne czarne dziury oraz modyfikacje grawitacji są również omówione. Mechanizmy produkcji ciemnej materii zostały bardzo ładnie i syntetycznie przedstawione ze szczegółowym rozróżnieniem mechanizmów nietermicznych i termicznych oraz procesów „freeze-in” i „freeze-out”. W odróżnieniu od wszystkich rozpraw, jakie miałem okazję czytać nadany mu został poetycko brzmiący tytuł „Szepty z ciemności” (*Whispers from the Darkness*). To bardzo trafna metafora obrazująca naszą wiedzę i zrozumienie problemu ciemnej materii. Dopiero ostatni podrozdział nosi nazwę „Introduction” i stanowi wprowadzenie w treść rozprawy, która omawia czysto grawitacyjny mechanizm produkcji ciemnej materii. Polega on na kreacji cząstek w mechanizmie pewnego rodzaju rezonansu parametrycznego sprzęgającego dynamikę pól kwantowych z ewolucją metryki tła.

Rozdział 2 stanowi omówienie standardowego modelu kosmologicznego opartego na metryce Friedmana-Lemaitre'a-Robertsona-Walkera. Jest to ładnie napisane kompendium teoretycznych podstaw współczesnej kosmologii, wzbogacone wzmiankami o obserwacyjnych przesłankach wspierających obraz teoretyczny. Wychodząc od krótkiego opisu ogólnej teorii względności (OTW) Einsteina, omówiona jest metryka jednorodnego i izotropowego wszechświata, jej konsekwencje, konforemna równoważność z metryką Minkowskiego, koncepcje horyzontów zdarzeń i cząstek, wynikające z równań Einsteina równania dynamiczne (Friedmana i Rychaudhuri'ego) i ich konsekwencje, składniki materialne wszechświata i ich wpływ na dynamikę ekspansji, historia termiczna wszechświata oraz problemy koncepcyjne modelu gorącego wielkiego wybuchu, propozycją rozwiązania których jest kosmiczna inflacja. Rozdział ten posiada spore walory dydaktyczne. Czytelnik nie będący znawcą kosmologii jest w stanie uzyskać spójny i poprawny obraz współczesnego obrazu tej dziedziny od strony teorii. Nie mam tu żadnych zastrzeżeń. Jedynym elementem, który mógłby być bardziej zaakcentowany i omówiony jest występowanie stałej kosmologicznej Λ . Autorka uwzględnia ją w działaniu Einsteina-Hilberta a priori. Czytelnik, nie znający współczesnej kosmologii zyskałby moim zdaniem przeczytawszy, iż dodanie stałej kosmologicznej obok skalaru Ricciego ustanawia najogólniejszą dopuszczalną postać gęstości lagranżianu Einsteina-Hilberta, lecz w klasycznej OTW stała ta jest (była) nieobecna. Z resztą jest też słusznie nieobecna w dyskusjach modeli inflacyjnych. Jej obecne, ponowne pojawienie się wywołane zostało odkryciem przyspieszającej ekspansji wszechświata, która fenomenologicznie jest bardzo dobrze przez nią wyjaśniana (co jest napisane w rozprawie), lecz to czy jest ona faktycznie ostatecznym rozwiązaniem tej zagadki jest dyskusyjne. Pełne przyjęcie jej realnego istnienia wiąże się też z gruntowną modyfikacją globalnej struktury przyczynowej wszechświata obrazowanej na diagramach Penrose'a i koniecznością przemyślenia twierdzeń



Penrose'a i Hawkinga. Pozwalam tu sobie na dygresję daleko odbiegającą od treści rozprawy i nie traktuję powyższej uwagi jako krytyki podejścia Autorki.

W rozdziale 3 poznajemy teoretyczne podstawy modeli inflacyjnych. W szczególności omówiony został model oparty na jednym polu skalarnym inflatonu, przybliżenie wolnego staczania się (ang. *slow-roll*) pola do minimum potencjału oraz użyteczne i powszechnie wykorzystywane parametryzacje tego opisu. Na stronie 62, po wzorze (3.18) gdy dyskutowane jest najniższego rzędu przybliżenie parametrów wolnego staczania się, powinno być $\eta_V \approx \epsilon_H$ zamiast $\eta_V \approx \eta_H$ jako pierwszy warunek. Następnie opisana została faza oscylacyjna pola inflatonu po zakończeniu fazy powolnego staczania się pola, czyli właściwej fazy inflacyjnej rozdymającej wszechświat przestrzennie. Rozdział ten jest bogaty w szczegóły rachunkowe dotyczące, realistycznego, opisu rozdzielającego ewolucję inflatonu na część szybko oscylującą oraz wolniej ewoluującą obwiednię (amplitudę pola) i wprowadzającego potęgową formę energii potencjalnej inflatonu. Następnie opisany jest proces generacji skalarnych i tensorowych zaburzeń metryki FLRW, równanie Mukhanova-Sasakiego oraz ważne obserwabla takie jak stosunek amplitud zaburzeń tensorowych do skalarnych r czy wykładniki widmowe, np. n_s . Zostały też omówione ograniczenia empiryczne na te wielkości pochodzące z badań promieniowania mikrofalowego (głównie satelita *Planck*). Na zakończenie Autorka krótko przedstawiła klasyfikację modeli inflacyjnych ze względu na ilość pól inflatonowych, postać potencjału oraz członu kinetycznego, postać sprzężenia z grawitacyjnymi stopniami swobody i funkcjonal działający wykraczający poza działanie Einsteina-Hilberta. W szczególności została podkreślona rola modelu Starobinśkiego. Rozdział kończy omówienie bogatej klasy modeli, dla których określone wartości parametrów n_s i r stanowią atraktor dynamiki pola inflatonu.

Rozdział 4 jest znacznie bardziej zaawansowany technicznie i bardziej szczegółowy niż poprzednie. Poświęcony jest on szczegółowemu omówieniu procesu rozgrzania (ang. *reheating*), podczas którego koherentne oscylacje pola inflatonu wokół położenia równowagi prowadzą do wzbudzeń pól kwantowych, czyli kreacji cząstek (m.in. Modelu Standardowego). Formalizm opisu wprowadzony jest najpierw ogólnie – nie precyzując cząstek, lecz jedynie ich naturę: cząstki skalarne i pseudo-skalarne (typu aksjonów), fermiony Diraca oraz cząstki wektorowe o spinie 1 (np. bozony cechowania w Modelu Standardowym). Przedstawione zostały szczegółowe obliczenia macierzy S , tempa produkcji cząstek oraz równania Boltzmanna dla pól: inflatonu i cząstek Modelu Standardowego. Następnie omówiono scenariusze rozgrzania, a w szczególności scenariusz czysto grawitacyjny. Przy założeniu, że oddziaływania inflatonu z cząstkami Modelu Standardowego są zależne od szerokości rozpadu, Autorka pokazała, że zależność szerokości rozpadu od czasu wpływa na produkcję sektora widzialnego oraz że wielkość ta wyznacza czas trwania epoki rozgrzania. Jest to oryginalny wynik Autorki.

Jak już omówiono wcześniej w rozprawie, kwantowe fluktuacje pola inflatonu generują również tensorowe zaburzenia metryki $t_{\mu\nu}$, czyli pierwotne fale grawitacyjne. Dokładniejszemu omówieniu tego zagadnienia poświęcony jest Rozdział 5, a w szczególności wpływowi dynamiki epoki rozgrzania na widmo pierwotnych fal grawitacyjnych. Standardowo rozważane tło pierwotnych fal grawitacyjnych dotyczy zazwyczaj modów powtórnie przekraczających horyzont Hubble'a w epoce dominacji promieniowania. Oryginalnym wynikiem uzyskanym przez doktorantkę było wyznaczenie rozkładu widmowego stochastycznego tła pierwotnych fal grawitacyjnych zmodyfikowanego przez mody wchodzące pod horyzont Hubble'a w epoce rozgrzania. Wynik ten ma duże znaczenie w świetle możliwości obecnych i przyszłych



detektorów fal grawitacyjnych wykrycia i zbadania tła pierwotnych grawitonów. Pozwoliłoby to na uzyskanie ważnych empirycznych ograniczeń na funkcję potencjału inflatonu i na wartości parametrów opisujących fazę rozgrzania.

Ostatni rozdział 6 poświęcony jest produkcji wektorowych cząstek ciemnej materii oddziałujących wyłącznie grawitacyjnie. Tego typu cząstki do niedawna nie były szerzej, o ile w ogóle, rozważane w badaniach. W rozdziale 6 dokładnie opisane zostały trzy scenariusze produkcji masywnych wektorowych cząstek ciemnej materii. A mianowicie, mechanizm czysto grawitacyjny oraz dwa, rozważane w rachunku perturbacyjnym, procesy oddziaływania grawitonów z tensorem energii-pędu pól materialnych Modelu Standardowego. Dokładne obliczenia tempa produkcji wykazały, że obecna zawartości ciemnej materii przewidywana w tych scenariuszach może odpowiadać znanym więzom obserwacyjnym. Pokazane też zostało, że czysto grawitacyjna produkcja lekkich cząstek wektorowych, w odróżnieniu od ciężkich, nie jest czuła na szczegóły dynamiczne epoki rozgrzania. Jest to kolejny oryginalny i ważny wynik Autorki.

Ostatni rozdział 7, bardzo ładnie i trafnie podsumowuje rozprawę, którą kończą dodatki. Zawierają one zestawienie obecnie przyjmowanych wartości podstawowych parametrów modelu kosmologicznego oraz zwarte podsumowania podstawowych zagadnień fizyki statystycznej stosowanych w rozprawie, takie jak: funkcja rozkładu w przestrzeni fazowej, równanie Boltzmanna i kwestia relatywistycznych stopni swobody. Literatura jest trafnie dobrana i wyczerpująco reprezentuje tematy omawiane w rozprawie.

Rozprawa jest napisana w sposób przejrzysty, czytelnie, bardzo dobrym językiem. Urzekła mnie literacka barwność opisowych fragmentów wprowadzających w trudne zagadnienia, płynnie przechodząca w ścisły i formalny język fizyki. W treści rozprawy nie znalazłem żadnych elementów, co do których mógłbym mieć jakiegokolwiek uwagi krytyczne. Czuję jedynie niedosyt odnośnie do braku dobitnego podkreślenia swojego wkładu w omawiane w rozprawie wyniki. Co do istotnego wkładu doktorantki nie mam wątpliwości sądząc po stylu napisania rozprawy oraz po przeczytaniu publikacji Autorki stanowiących jej podstawę. Oceniam rozprawę jako bardzo dobrą, o doskonałych walorach dydaktycznych. W mojej opinii powinna ona zostać upubliczniona najszerszej społeczności fizyków na archiwum arXiv.org.

Reasumując, uzyskane przez doktorantkę, oryginalne wyniki zawarte w przedstawionej mi do oceny rozprawie oraz sposób ich prezentacji wskazujący na bardzo dobrą znajomość tematyki związanej z modelami inflacyjnymi, fizyką wczesnego wszechświata oraz z tematyką ciemnej materii sprawiają, że rozprawa spełnia formalne, ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie Pani mgr Anny Sochy do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora i do publicznej obrony.

Prof. dr hab. Marek Biesiada