



Warszawa 29.05.2023

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

***Ocena rozprawy doktorskiej mgr inż. Bartłomieja Kiczka pt.
„Structures and traces of dark matter in different systems – from condensed
matter to black hole physics”***

W swej rozprawie doktorskiej pan mgr inż. Bartłomiej Kiczek przedstawił oryginalne wyniki badań dotyczących oddziaływania ze zwykłą materią pewnych kandydatów na ciemną materię (aksjono-podobne cząstki oraz ciemne fotony).

Problem ciemnej materii we wszechświecie jest jednym z największych wyzwań fizyki XXI wieku. Ma on już około stuletnią historię, gdzie najpierw rosnące dowody obserwacyjne budowały, obecnie już głęboko ugruntowane, przekonanie, że budżet masy znanej nam materii szacowany na podstawie obserwacji w świetle widzialnym (obecnie jest to praktycznie pełen zakres widma fal elektromagnetycznych) jest niewystarczający do wyjaśnienia oddziaływań grawitacyjnych w wielkoskalowych strukturach takich jak galaktyki i ich gromady. Początkowo były to przesłanki dynamiczne np. płaskie krzywe rotacji galaktyk, później wzmocnione dowodami pochodzącymi z soczewkowania grawitacyjnego. Mianowicie ugięcie światła odległego obiektu, np. kwazara przez bliżej leżącą masywną konfigurację np. galaktykę czuje pełną zawartość masy niezależnie od tego czy i ile światła ona emituje. Kolejną – tym razem po części pośrednią – przesłanką astrofizyczną jest problem powstania wielkoskalowej struktury we wszechświecie z pierwotnych fluktuacji gęstości, których obecność zapisana jest w widmie anizotropii promieniowania mikrofalowego. Bez udziału neutralnej elektrycznie masywnej składowej nadwyżki gęstości materii w silnie zjonizowanej plazmie istniejącej do epoki ostatniego rozproszenia, galaktyki nie miałyby szans powstać w rozszerzającym się wszechświecie o wieku liczącym obecnie ok. 13 mld lat. Ponadto, kosmologia dostarcza dowodów na to iż materii oddziałującej grawitacyjnie jest ok. 10-krotnie więcej niż znanej nam materii – nazywanej żargonowo barionową – której zawartość jest precyzyjnie określona wymogiem aby obserwowana zawartość pierwiastków lekkich H, ^4He , ^3He , ^7Li zgadzała się z przewidywaniami nukleosyntezy pierwotnej. Składa się to na spójny obraz, którego elementem jest tajemnicza składowa zwana ciemną materią. Innym rozwiązaniem byłoby szukanie odpowiedzi w modyfikacjach teorii grawitacji, natomiast teoria cząstek elementarnych jest również w opinii większości fizyków niekomplementa. Mimo solidnego oparcia w kwantowej teorii pola i potężnych sukcesów eksperymentalnych jaki odniósł Model Standardowy cząstek elementarnych pozostaje on konstrukcją otwartą na modyfikacje płynące z eksperymentu. Warto tu wspomnieć istniejący przez wiele dekad paradygmat bezmasowych neutrin w MS



zmieniony w sposób naturalny po odkryciu oscylacji stanów zapachowych neutrin, czyli po uzyskaniu dowodu na posiadanie przez nie masy. Pojawiły się też dwa wątki: supersymetrii (SUSY), czyli fundamentalnej symetrii pomiędzy fermionami i bozonami oraz symetrii Peccei-Quinna wyjaśniającej problem symetrii CP w chromodynamice kwantowej. Oba przewidują istnienie nowych cząstek mogących wyjaśniać ciemną materię. W pierwszym przypadku są to słabo oddziałujące (z cząstkami MS) cząstki WIMPy, w drugim zaś tzw. aksjony. O ile WIMPy byłyby bardzo masywne (tysiąc razy bardziej od protonu), aksjony są obdarzone bardzo małą masą, lecz jako bozony mogą tworzyć kondensaty. Wobec braku dowodów na istnienie cząstek supersymetrycznych (przynajmniej w najprostszych wersjach SUSY) ciężar poszukiwań ciemnej materii przesunął się obecnie w stronę aksjonów i szerzej – aksjono-podobnych cząstek (ALP). Akceptując ten obraz musimy przyjąć, że nasze laboratoria, Układ Słoneczny, nasza Galaktyka, jej gwiazdy (czarne dziury) zanurzone są w ciemnej materii, której obecność może się w pewien sposób ujawnić. Badania pana mgr inż. Bartłomieja Kiczka dotyczyły takich właśnie zagadnień. W oczywisty sposób uzyskane w rozprawie wyniki stanowią wartość dodaną do szerokiego nurtu współczesnych badań.

Przedstawiona mi do oceny rozprawa została napisana w języku angielskim. W istocie jest ona przewodnikiem po zbiorze pięciu prac opublikowanych przez doktoranta w bardzo dobrych czasopismach. Składa się ona z czterech rozdziałów poprzedzonych spisem treści i zakończonych bibliografią.

Rozdział 1 stanowi zwięzłe wprowadzenie do problemu ciemnej materii we wszechświecie. Zwięzłe, lecz bardzo dobrze spełnia zamierzony cel. Rozdział 2 zawiera skrótowe omówienie teoretycznego kontekstu rozprawy. Krótko opisane zostały: oryginalne aksjony teorii PQ, cząstki aksjono-podobne, eksperymentalne poszukiwania tych cząstek oraz koncepcja ciemnego fotonu. Ładnie opisane zostały czarne dziury z włosami oraz koncepcja dualności AdS/CFT. Dwa podrozdziały zostały poświęcone alternatywnym wyjaśnieniom ciemnej materii: teorii MOND Milgroma, teoriom $f(R)$ oraz masywnych nieświecących obiektów astrofizycznych. Przy ogólnie dobrym wrażeniu tego rozdziału, mam kilka drobnych uwag. Po pierwsze, na stronie 6 doktorant charakteryzując aksjono-podobne cząstki odnosi się do długości fali de Broglie'a podczas gdy standardowo używaną, w tym kontekście, wielkością jest długość fali Comptona. Ponadto stwierdzenie, że ta wielkość dla elektronu jest rzędu nanometrów nie jest prawdą – to jest skala pikometrów, czyli o trzy rzędy wielkości mniejsza. Odnośnie zmodyfikowanych teorii grawitacji wypadałoby napisać, że lista kandydatów jest na prawdę znacznie dłuższa niż zostało przedstawione. Opis teorii MOND jest bardzo ubogi, na przykład wypadałoby dodać, że oryginalna wersja Milgroma znalazła teoretyczne ogólnie kowariantne sformułowanie np. w ramach teorii TeVeS Beckensteina. Zdanie na temat teorii MOND: „it miserably failed in different applications” jest nieprawdziwe. W rzeczywistości – zupełnie przeciwnie – MOND przewidział całe mnóstwo później odkrytych własności galaktyk. Konieczność dodawania ciemnej materii do MONDu jest wciąż debatowana, bez ostatecznej konkluzji. W opisie zwartych ciemnych obiektów i ich wkładzie do budżetu masy, wypadałoby wspomnieć o pierwotnych czarnych dziurach, których wkład masowy omija ograniczenie na materię barionową z nukleosyntezy. Oczywiście uwagi powyższe nie mają znaczenia dla meritum rozprawy. W rozdziale 3 doktorant przedstawił matematyczne i numeryczne metody stosowane w swoich pracach. Jest to bardzo dobre resume. Miałby tu jedynie komentarz, że wśród algorytmów całkowania, oprócz schematu Rungego-Kutty mógłby się też pojawić schemat Bulirscha-Stoer'a, który jest jednym z najbardziej stabilnych znanych mi algorytmów.



Rozdział 4 jest centralnym elementem rozprawy. Pierwsze pod-rozdziały streszczają zawartość opublikowanych prac, które następnie zostały umieszczone in extenso. W pierwszej pracy doktorant zbadał sferycznie symetryczne konfiguracje w teorii, której działanie zawiera człony: Hilberta, tensor Faradaya zwykłej teorii Maxwella, analogiczny tensor pochodzący od pola cechowania $U(1)$ w sektorze ciemnym (ciemny foton) oraz człon mieszający sektory. Uzyskana została metryka opisująca takie konfiguracje oraz zbadano warunki stabilności. Ciekawym wynikiem jest możliwość osiągania mniejszych, w porównaniu z OTW, rozmiarów zwartych obiektów otoczonych ciemnym polem Maxwella. W drugiej pracy badany był wpływ ciemnego pola na skalarny włos czarnych dziur. W podejściu termodynamicznym skonstruowany został diagram fazowy w tej teorii. Możliwe fazy to: uogólniona (w poprzedniej pracy) czarna dziura Reissnera-Nordstroma, czarna dziura z włosami skalarnymi oraz gwiazda bozonowa. Jest to bardzo ciekawy wynik. Kolejna praca omawia możliwe oddziaływanie cząstki ciemnej materii na sygnał powstający w urządzeniach typu DC SQUID. Do wykonania obliczeń zastosowana została odpowiedniość AdS/CFT. Wynik jest pozytywny – można uzyskać sygnał od cząstek, których długość fali Comptona jest rzędu rozmiaru przerwy w złączu Josephsona. Jest to bardzo ciekawe spostrzeżenie i potencjalnie może ono znaleźć zastosowanie praktyczne. W ostatniej pracy z cyklu rozważane były konfiguracje chmury aksjonowej otaczającej namagnetyzowane rotujące tunele czasoprzestrzenne. Uzyskana różnica w profilach chmur aksjonowych otaczających czarną dziurę Kerr'a i tunel czasoprzestrzenny jest ciekawym wynikiem. Może on być punktem wyjścia sformułowania obserwacyjnych testów różnicujących te obiekty. Rozprawę zamykają dwa kolejne podrozdziały rozdziału 4. Pierwszy przedstawia pozostałe osiągnięcia doktoranta: 3 wystąpienia i 2 postery na międzynarodowych konferencjach, 1 publikacja o tematyce fizycznej oraz 6 publikacji dotyczących zastosowań metod informatycznych w teledystrybucji bio medycznej. Ostatni podrozdział zawiera krótki zarys wizji rozwijania przedstawionych w rozprawie badań. Następujące po nim oświadczenia współautorów nie budzą wątpliwości w wiodącą rolę doktoranta w publikacjach, których cykl stanowi sedno rozprawy.

Zwięzłość pierwszych trzech rozdziałów budzi pewien niedosyt. Natomiast, biorąc pod uwagę odmienną, wybraną przez doktoranta, formę przewodnika po pracach w stosunku do klasycznego sposobu pisania rozpraw, oceniam rozprawę jako bardzo dobrą: językowo, stylistycznie i merytorycznie.

Reasumując, uzyskane przez doktoranta, oryginalne wyniki zawarte w przedstawionej mi do oceny rozprawie oraz sposób ich prezentacji wskazujący na dobrą znajomość tematyki związanej z ciemną materią i fizyką czarnych dziur oraz metod numerycznych sprawiają, że rozprawa spełnia formalne, ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie pana Bartłomieja Kiczka do dalszych etapów przewodu doktorskiego i do publicznej obrony. W moim przekonaniu rozprawa zasługuje na wyróżnienie.

Prof. dr hab. Marek Biesiada