

Prof. dr hab. Zbigniew Wąs
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
31-342 Kraków, ul. Radzikowskiego 152

Recenzja rozprawy habilitacyjnej dr. Enrico Sessolo 'Sygnały ciemnej materii w modelach Nowej Fizyki'

Tematem przedstawionej rozprawy habilitacyjnej Pana dr. Enrico Sessolo jest ocena możliwych scenariuszy Nowej Fizyki pozwalających na objaśnienie istnienia ciemnej materii oraz jej fenomenologicznego wpływu.

Rozprawa oparta jest o osiem własnych prac, głównie w JHEP i po jednej w Phys. Rev. D, w JCAP oraz Adv. High Energy Physics. Nie są to wszystkie opublikowane po doktoracie przez dr. Enrico Sessolo prace. Dalszych dwanaście pozycji, choć przynajmniej po części o zgodnej z Rozprawą tematyce i również opublikowanych w renomowanych czasopismach, nie zostało wykorzystanych. Podkreśla to bogactwo zebranych po doktoracie wyników. Przed doktoratem dr Enrico Sessolo opublikował trzy dalsze prace. Warto tutaj wspomnieć o danych bibliometrycznych. W chwili obecnej jego indeks Hirscha wynosi 15 a liczba cytacji 922. Jest to wyraźnie więcej niż we wrześniu 2018, kiedy rozprawa została złożona, wtedy wskaźniki te wynosiły odpowiednio 13 i 822.

Rozprawa składa się z autoreferatu, kopii załączonych publikacji oraz dokumentów uzupełniających takich jak kopia dyplomu, spisy publikacji, spis realizowanych grantów, życiorysu itp. Rozumiem, że autoreferat napisany został w języku angielskim, a następnie przetłumaczony na język polski. Takie odczucie, być może wynika też z tego, że wiele terminów naukowych jest lepiej osadzonych w tym języku. W każdym razie, wersja angielska była przyjemniejsza w czytaniu i do niej będę się odnosił w dalszym tekście.

Zagadnienia związane z pojęciem ciemnej materii stanowią bardzo złożoną tematykę. W zasadzie chromodynamika kwantowa, w połączeniu z teorią oddziaływań elektroślabych oraz teorią grawitacji, daje jednoznaczny opis wszystkich obserwowalnych zjawisk fizycznych. Faktycznie wszystkie zjawiska obserwowane w eksperymentach na Ziemi są opisywane przez te teorie, łącznie zwane Modelem Standardowym. Jednak jeśli chodzi o obserwacje astronomiczne to tak już nie jest. Przykładem jest ruch obrotowy galaktyk i gromad galaktyk, wskazujący że obiekty te, powinny mieć znacznie większą masę niż ta, która odpowiada widocznym obiektom: gwiazdom, obłokom pyłu i gazu. Jednym ze sposobów wyjaśnienia, byłaby obecność dużej ilości, jednostajnie rozmieszczonych w całej galaktyce słabo oddziaływujących cząstek, które mogłyby odpowiadać za jednostajny ruch kątowy wszystkich składników galaktyk. Żadna z cząstek elementarnych Modelu Standardowego nie ma własności pozwalających na taką rolę.

Niewątpliwie pewna epoka w rozwoju Nauki będzie związana z wytłumaczeniem tych zjawisk. Aktualnie niepotwierdzone pomiarami eksperymentalnymi nowe teorie pozwalające na wyjaśnienie takich zjawisk, mogą doprowadzić do znacznie głębszego niż obecnie zrozumienia budowy materii. Wiele nowych bądź istotnie dokładniejszych eksperymentów jest poświęconych tej tematyce. Są to wyzwania które przesuwają się na pierwszy plan badań podstawowych. Przedstawiona rozprawa może więc pośrednio wpłynąć na jedno z przełomowych zagadnień w fizyce

cząstek elementarnych i astrofizyki. Rozprawa została zrealizowana w ramach udziału autora we wspólnych pracach kilku badaczy i może odegrać ważną rolę w rozwoju Fizyki. Faktyczny scenariusz realizowany przez Nature pozostaje na razie nieznany.

Autoreferat Pana dr. Enrico Sessolo jest napisany w języku angielskim i przetłumaczony na język polski. Został starannie wyedytowany zarówno pod względem językowym, jak i graficznym. Wersja polska o 22+3 (i angielska o 20+3) stronach składa się ze wstępu, kolejnych 8 rozdziałów oraz podsumowania. Obie wersje językowe zawierają 8 rysunków oraz oddzielne spisy cytowanych prac. Załączone prace stanowią główną część rozprawy. Ponieważ już są opublikowane w recenzowanych czasopismach więc nie ma potrzeby uzasadniania ich wartości oraz dyskusji (niebagatelnej) strony warsztatowej pracy.

Autoreferat został podzielony na kilka części:

- Wprowadzenie (rozdz. 5.1) stanowi klarowne wprowadzenie do tematyki i motywacji rozprawy. Rozpoczyna się od przedstawienia podstawowych kontekstów/motywacji potrzeby rozbudowania fizyki Modelu Standardowego o obecność masywnych słabo oddziaływujących pól (tzw. cząstek WIMP), które mogłyby odpowiadać za główną część masy galaktyk i gromad galaktyk, niezbędną dla objaśnienia własności ruchu rotacyjnego i struktury galaktyk. Jest podkreślone że istnieje szereg alternatywnych rozwiązań które mogłyby być w zgodzie z obserwacjami.
- Rozdział 5.2 jest poświęcony wskazówkom wynikającym z obserwacji astrofizycznych. Cytowana jest literatura przeglądowa, wymienione i objaśnione są najistotniejsze obserwowane zjawiska, takie jak krzywa rotacji galaktycznej, czy soczewkowanie grawitacyjne. Szczególny ważny dla tematyki rozprawy wynik obserwacyjny dotyczy gromady galaktyk o nazwie "Bullet". Wskazuje na inny rozkład masy barionowej i ciemnej materii w tej gromadzie. Został uznany jako wskazówka istnienia słabo oddziaływującej ciemnej materii. Różne wersje, tzw zimnej bądź ciepłej ciemnej materii były tutaj wymienione w kontekście wczesnych etapów ewolucji wszechświata.
- Rozdział 5.3 jest poświęcony potencjalnym wskazówkom wynikającym z rozważań kosmologicznych. W szczególności, tych poświęconych tzw. termicznemu 'zamarzaniu' stopni swobody, odpowiadających ciężkim cząstkom i w konsekwencji aktualnej częstości ich występowania.
- Rozdział 5.4 zawiera dalsze pod-rozdziały i w dużej mierze dalej stanowi rozwinięcie wprowadzenia. W tej części rozprawa jest skoncentrowana na tzw założeniu naturalności tzn. założeniu że jeśli nie ma powodów wynikających z zasad symetrii to wszystkie oddziaływania powinny mieć podobne stałe sprzężenia. Wynikają z tego ograniczenia pochodzące z pomiarów, a właściwie całkowitego braku odkrycia, we współczesnych eksperymentach takich jak na LHC, nowych cząstek. W tej dyskusji, po raz pierwszy są przedstawiane podstawowe dla rozprawy wyniki zawarte w publikacji [H1] Pana dr. Enrico Sessolo. Wszystkie referencje do jego prac stanowiących część rozprawy są oznaczone literą "H" oraz kolejną cyfrą arabską.
- Rozdział 5.5 jest poświęcony więzom dla ciemnej materii wynikającym z odkrycia, a więc i masy bozonu Higgsa, określa to też parametry wartości próżniowej dla tego pola. Praca [H2] rozprawy stanowi wkład w tą tematykę. Obserwowana masa bozonu Higgsa ma konsekwencje, np. dla spodziewanej masy neutralina oraz określa tzw 'credibility region' dla parametrów sprzężeń; cokolwiek wiarygodność miałyby znaczyć dla cząstki elementarnej.

- Dalsze ograniczenia na neutralino jako kandydata dla ciemnej materii są przedstawione w rozdziale 5.6 podsumowującym wyniki prac [H3] i [H4] oraz [H5]. Są możliwe nie tylko dzięki pomiarom LHC, ale też na przykład, dzięki obserwacjom przeprowadzonym z pomocą macierzy teleskopów Cherenkova. W celu dokonania obliczeń dla sygnatur oddziaływań ciemnej materii, scenariusz tzw. fenomenologicznej minimalnej super symetrii był używany. Wymagało to założeń dotyczących łamania parzystości.
- Rozdział 5.7 oraz referencja [H6] jest poświęcona możliwym bezpośrednim sygnaturom dla słabo oddziałujących masywnych cząstek. W tym celu rozważane są nie tylko modele oparte o supersymetrię. Decydujące jest jak takie hipotetyczne sygnatury konfrontują się z obserwacjami; bezpośrednimi oraz poprzez promieniowanie gamma. Dzięki temu możemy odkryć bądź organiczyc możliwe parametry cząstek-kandydatów. W tym kontekście wymienione są eksperymenty CTA, XENON-1T, Fermi-LAT.
- Podobny program, aczkolwiek bardziej szczegółowo dopracowany, dotyczy eksperymentów LHC jest opisany w rozdziale 5.8. Chodzi tutaj przede wszystkim o procesy produkcji tzw. mono-X, gdzie w stanie końcowym jest obserwowalny pojedynczy jet hadronowy, foton lub inna cząstka. Szczegółowe dopracowanie pozwoliło określić, że tak przeprowadzone pomiary nie wykluczają całkowicie istnienia takich cząstek (kandydatów dla ciemnej materii) nawet o eksperymentalnie dostępnych masach. Może się to zdarzyć dla szczególnych kombinacji stałych sprzężenia, tzw. ślepych punktów. Kontrybucją do tej tematyki jest praca [H7].
- Kolejny rozdział, 5.9, jest poświęcony konsekwencjom wyników pomiaru anomalnego momentu magnetycznego muonu dla modeli słabo oddziałujących nowych masywnych cząstek. Użycie uproszczonych modeli jest znowu jak najbardziej uzasadnione, bo pozwala skoncentrować uwagę na najważniejszych własnościach, które są równocześnie bardziej uniwersalne. Więzy wynikające z innych pomiarów, np. wcześniej omówionych dla LHC, są również przedstawione jako wprowadzenie do symulacji zebranych w kolejnej publikacji [H8] stanowiącej część rozprawy Pana dr. Enrico Sessolo. Tym razem głównie dla anomalnego momentu magnetycznego muonu. Jest to przypadek pomiaru szczególnie interesującego, ze względu na pewne napięcie pomiędzy wynikami pomiarów a przewidywaniami teoretycznymi z Modelu Standardowego.
- Rozdział 5.10 zawiera podsumowanie.

Uważam że tematyka przedstawionej Rozprawy jest ważna i zawartość merytoryczna pracy zdecydowanie odpowiada wymaganiom stawianym rozprawom habilitacyjnym. Dokumentuje uczestnictwo i wniesienie wkładu w działalność, która być może doprowadzi w przyszłości do przełomu w naszym rozumieniu własności oddziaływań fundamentalnych, a być może także budowy Wszechświata.

Po przeczytaniu pracy, pewien niedosyt pozostawił mi jednakże fakt, że wyniki analizy nie uwzględniają nowych wyników obserwacyjnych ostatnich dziesięciu lat, takich jak odkrycie dzięki pomiarom fal grawitacyjnych cięższych niż spodziewane czarne dziury oraz odkrycie istnienia brązowych karłów. Nawet jeśli nie są to dobre/wystarczające kandydaty dla alternatywnego dla ciemnej materii, rozwiązania kwestii ruchu obrotowego galaktyk bądź gromad galaktyk, warto byłoby o tym wspomnieć. Szczególnie, że jak jest to podkreślone w rozprawie, niektóre wcześniej przyjmowane założenia będące podstawą analizy hipotez czarnej materii, patrz np. sekcja 5.1 były krytykowane jako nietrafione.

W każdym razie, jak autor słusznie podkreśla, nieskuteczne poszukiwania eksperymentalnych kandydatów dla ciemnej materii trwają już czterdzieści lat. W moim odczuciu byłoby

więc bardziej naturalne, gdyby pewne założenia, takie jak na początku sekcji 5.1 “The long held paradigm” były podparte referencją, a rozprawa dzięki temu, mogła się od nich dystansować. Tak jak dalej w tej samej sekcji jest to podkreślone słowami “traditional serches for WIMPs is not warranted ... over-optimistic expectations expectations founded on theoretical prejudice, which failed to materialize ...”. Tak więc krytyczne podejście do założeń, nawet bardzo naturalnych, może być uzasadnione. Być może stwierdzenie w drugim paragrafie sekcji 5.9 “The discrepancy ... at the level of $\sim 3.5\sigma$...” można uznać za zbyt mocne, ze względu na tzw. “look else” mechanizm statystyczny. Z powyższych powodów, w moim ale niekoniecznie powszechnym odczuciu, pierwsze zdanie podsumowania sekcji 5.10 jest zbyt mocne. Rozprawę habilitacyjną można rozumieć bowiem nie tylko jako podsumowanie wyników prac ale też jako okazję do krytycznego spojrzenia na użyte założenia.

Jak słusznie podkreślone w pracy, patrz sekcja 5.4.1, dla tematyki istotne są wyniki z co najmniej trzech dziedzin fizyki: cząstek elementarnych, jądrowej i astrofizyki. Jest to ważne samo w sobie, ale najprawdopodobniej, ta wielkontekstowość powodowała że skróty okazywały się dla mnie czasem, przy pierwszym czytaniu, nieczytelne i trudne do zapamiętania, pomimo iż w większości wypadków były zdefiniowane. Na przykład skrót UV nie jest dla mnie naturalnym skrótem dla ultra-violet. Pewno użyłbym małych liter, podobnie nienaturalny był dla mnie skrót VL fermions dla vector like fermions, choć (muszę to przyznać) jest często używany w literaturze. Za to skrót “vev ratio” w czwartym paragrafie rozdziału 5.5 byłby dla mnie czytelniejszy gdyby był oznaczony dużymi literami. Spis używanych skrótów i oznaczeń byłby bardzo pożądanym.

Zaobserwowałem też pewne nieznaczące niedociągnięcia w pracy edytorskiej. Na przykład “Be recalling” zamiast “By recalling” w trzecim paragrafie rozdziału 5.5.

Podsumowując, uważam tym niemniej, że przedstawiona rozprawa habilitacyjna jest na bardzo dobrym poziomie, dotyczy bardzo istotnej tematyki pogranicza współczesnej fizyki wysokich energii, fizyki jądrowej i astrofizyki i została zrealizowana w ramach szerokiej współpracy, z badaczami nie tylko z Warszawy ale też i innych ośrodków w Polsce oraz za granicą.

Moje uwagi należy rozumieć bardziej jako podkreślenie wagi tematyki rozprawy i potencjalnego przełomu w nauce do którego taka działalność może doprowadzić niż jako krytykę Rozprawy. Oceniam przedstawioną rozprawę habilitacyjną jako bardzo dobrą, spełniającą wymagania ustawy dotyczącej rozpraw habilitacyjnych i wnoszę o dopuszczenie do dalszych etapów przewodu habilitacyjnego.

Zbigniew Wąs