



Centrum Fizyki Teoretycznej

Polskiej Akademii Nauk

Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa

Tel. (+48 22) 847 09 20, Fax/Tel: (+48 22) 843 13 69

Email: cft@cft.edu.pl

NIP 525-000-92-81

Warszawa, dn. 03.04.2023 r.

Recenzja wniosku i osiągnięcia naukowego przedstawionego we wniosku habilitacyjnym oraz dorobku naukowego, dydaktycznego i organizacyjnego dr Andrzeja Jana Hryczuka.

Szanowna Komisjo Habilitacyjna,

Mając zaszczyt recenzować wniosek habilitacyjny Pana doktora Andrzeja Jana Hryczuka, pragnę przedstawić moje spostrzeżenia dotyczące sylwetki kandydata oraz jego osiągnięć naukowych i zawodowych.

Na wstępie chciałem nadmienić, że niniejsza recenzja została oparta o angielską wersję "autoreferatu", którą zresztą sam kandydat poleca jako bardziej źródłową. Dokumentacja, na której opieram recenzję datowana jest kwalifikowanym podpisem elektronicznym kandydata z dnia 13.07.2022. Zapoznałem się również z oryginalną wersją polską tego dokumentu. Nie mam wątpliwości, że wersja angielska jest źródłową, jednak na ile mogłem się zorientować obie wersje tekstu są sobie bardzo dobrze odpowiadające i stanowią wzajemne, dosyć wierne tłumaczenia.

Sylwetka kandydata

Dr Andrzej Hryczuk jest absolwentem wydziału fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, gdzie pracę magisterską pt. "Aksjony w teorii cząstek elementarnych i kosmologii" pod kierunkiem prof. Krzysztofa A. Meissnera przedstawił z wyróżnieniem w 2007 roku. Studia doktoranckie odbył za granicą w słynnym włoskim instytucie "*Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzati (SSISA)*" w Trieście. Pracę doktorską pt. "*Loop and non-perturbative effects in the dark matter phenomenology*" napisaną pod opieką prof. Piero Ullio obronił we wrześniu 2012 roku. Datę wyszukałem w Internecie, gdyż nie jest ona nigdzie podana we wniosku habilitacyjnym. Toteż od czasu uzyskania doktoratu do złożenia wniosku habilitacyjnego upłynęło niespełna 10 lat. Po uzyskaniu stopnia doktora, Andrzej Hryczuk odbył dwa znaczące staże podoktorskie (tj. był zatrudniony na naukowym stanowisku typu "*post-doc*"). Pierwsze stanowisko było na Uniwersytecie Technicznym w Monachium w Niemczech (od 2012 do 2015). Kolejny 3-letni okres zatrudnienia na takim stanowisku miał miejsce w latach

2015-2018, kiedy to kandydat pracował na Uniwersytecie w Oslo, w Norwegii. Pomędzy tymi dwoma znaczącymi i długimi stażami po doktoracie miał miejsce bardzo krótki, zaledwie trzy-miesięczny, staż w zespole prof. Leszka Roszkowskiego w Narodowym Centrum Badań Jądrowych (NCBJ), gdzie też od 2018 roku dr Hryczuk jest zatrudniony do dzisiaj na stanowisku adiunkta. Warto odnotować, że staże podoktorskie dr Hryczuka miały miejsce w prestiżowych i wiodących naukowo na świecie zespołach i uczelniach.

Osiągnięcie habilitacyjne

Jako osiągnięcie habilitacyjne, Pan dr Andrzej Hryczuk przedstawił siedem artykułów naukowych, oznaczonych i wymienionych jako od H1 do H7, które stanowią jednotematyczną serię publikacji na temat *"Precyzyjne wyznaczanie gęstości reliktovej ciemnej materii"*. Artykuły te zostały opublikowane w cenionych i prestiżowych czasopismach naukowych takich jak Journal of High Energy Physics, Physical Review D oraz European Physical Journal C.

Badania nad naturą ciemnej materii mają zasadnicze znaczenie we współczesnej kosmologii. Procesy odpowiedzialne za materiogenezę i powstanie ciemnej materii w młodym Wszechświecie są kluczowe dla zrozumienia, jakie właściwości fizyczne cząsteczkowej ciemnej materii można powiązać z obserwacjami atroficznymi jej śladów oraz eksperymentami celującymi w bezpośrednią detekcję na Ziemi. Badania kandydata skupiają się na rozwijaniu nowych narzędzi i metod numerycznych umożliwiających bardziej dokładne i precyzyjne modelowanie procesów powstawania ciemnej materii, w tym uwzględnienie nowych scenariuszy produkcyjnych i uwzględnienie wpływu samorozpraszania ciemnej materii na jej obfitość reliktową. Wyniki tych badań przyczyniają się do lepszego zrozumienia właściwości ciemnej materii i oferują nowe możliwości testowania modeli kosmologicznych, co jest kluczowe dla dalszego postępu w tej dziedzinie.

W pracy H1 pt. *"Relic density computations at NLO: infrared finiteness and thermal correction"*, M. Beneke, F. Dighera, A. Hryczuk JHEP 1410 (2014) 045, autorzy omówili wyliczenia gęstości reliktovej ciemnej materii z uwzględnieniem poprawek termicznych i problemów związanych z nieskończonościami podczerwonymi. Artykuł omawia problem związany z poprawnymi prognozami obfitości reliktovej ciemnej materii, który wymaga uwzględnienia poprawek kolejnego rzędu (z ang. *next-to-leading order*). Autorzy wykorzystali kwantową teorię pola przy założeniu sytuacji nierównowagi (non-equilibrium), aby poprawić konwencjonalną metodę i określić poprawkę skończonotemperaturową do przekroju czynnego na anihilację, co pozwala na bardziej precyzyjne wyliczenia obfitości reliktovej ciemnej materii. Zgodnie z oświadczeniami kandydata i współautorów, jego wkład w tę publikację był znaczący i wiodący.

W artykule H2 *"Finite-temperature modification of heavy particle decay and dark matter annihilation"*, M. Beneke, F. Dighera, A. Hryczuk, JHEP 1609 (2016) 031, autorzy przeanalizowali modyfikacje rozpadu ciężkich cząstek oraz anihilacji ciemnej materii z uwzględnieniem poprawek skończonotemperaturowych. W artykule omawia się modyfikację opisu zjawisk związanych z rozpadem i anihilacją ciężkich cząstek w środowisku o temperaturze efektywnej poniżej masy cząstki. Autorzy tutaj wykorzystują technikę rozwinięcia iloczynu operatorowego (Operator Product Expansion), czyli aksjomatu nieperturbacyjnej kwantowej teorii pola definiującego iloczyn pól jako sumę tych samych pól.

Zastosowanie metody OPE do obliczeń pozwala autorom wykazać, że poprawki termiczne adekwatne nawet do szerszego zakresu zjawisk można wyznaczyć w sposób znacznie uproszczony. W szczególności udowadniają, że w przypadku anihilacji ciemnej materii, poprawka termiczna jest proporcjonalna do T^4/m_χ^4 . Podsumowując, artykuł omawia nową metodę wyznaczania poprawek termicznych do zjawisk związanych z rozpadem i anihilacją ciężkich cząstek w środowisku termicznym, która jest prostsza i bardziej uniwersalna niż dotychczas stosowane podejścia. Oświadczenia kandydata i współautorów pracy wskazują, że wszyscy trzej mieli w nią równorzędny znaczący wkład.

Praca H3 to *“Early kinetic decoupling of dark matter: when the standard way of calculating the thermal relic density fails”*, T. Binder, T. Bringmann, M. Gustafsson, A. Hryczuk, Phys.Rev D96 (2017) no.11 115010. W artykule H3 autorzy omówili wczesne rozprężanie kinetyczne ciemnej materii i pokazali, w jakich warunkach standardowe podejście do obliczania gęstości reliktovej może zawodzić. Autorzy zwracają uwagę na to, że jedno z założeń standardowej procedury obliczania gęstości reliktovej ciemnej materii, mianowicie założenie o lokalnej równowadze termodynamicznej podczas procesu “freeze-outu” (termiczna produkcja ciemnej materii na skutek utraty równowagi chemicznej) nie musi być w ogólności spełnione. Przedstawiają dwa sposoby radzenia sobie z takimi sytuacjami i pokazują, że nawet w przypadku prostych modeli ciemnej materii, np. jak singlet skalarny, przewidywania dla gęstości reliktovej mogą różnić się o jeden rząd wielkości w porównaniu z wynikami uzyskanymi tradycyjnym podejściem. Oświadczenia wszystkich współautorów wskazują, że wkład dr Hryczuka w tą publikację był wiodący.

W artykule H4 *“Improved bounds on Z_3 singlet dark matter”*, A. Hektor, A. Hryczuk, K. Kannike JHEP 03 (2019) 204, przedstawiono ulepszony model ciemnej materii opartej na symetrii Z_3 . Zastosowano surowsze ograniczenia stabilności potencjału oraz wprowadzono poprawki w zakresie zmiany temperatury ciemnej materii. Dzięki temu autorom udało się ustalić mocniejsze ograniczenia dolne na parametry związane z eksperymentami służącymi bezpośrednio wykrywaniu ciemnej materii. Przedstawiono również modyfikacje wymaganego sprzężenia z polem Higgsem dla obszaru, w którym freeze-out jest zdominowany przez procesy rezonansowe lub pół-anihilacji (z ang. *semi-annihilation*). Semi-anihilacja odnosi się do procesu, w którym dwie cząstki ciemnej materii oddziałują ze sobą i produkują inną cząstkę ciemnej materii oraz cząstkę Standardowego Modelu, taką jak bozon oddziaływania lub bozon Higgsa. Wyniki pokazują, że wkrótce dostępne eksperymenty powinny pozwolić zbadać spory obszar przestrzeni parametrów dla modeli ciemnej materii z pół-anihilacją. Wkład dr Hryczuka w prace H4 jest wiodący.

Artykuł H5 *“Dark matter Relic Abundance beyond Kinetic Equilibrium”*, T. Binder, T. Bringmann, M. Gustafsson, A. Hryczuk, Eur.Phys.J.C 81 (2021) 7, 577, opisuje oszacowania gęstości reliktovej ciemnej materii w ujęciu poza równowagą kinetyczną. Autorzy pracy wprowadzają narzędzie numeryczne o nazwie DRAKE, które umożliwia dokładne przewidywanie obfitości reliktovej ciemnej materii w modelach, gdzie standardowe założenie o równowadze kinetycznej w trakcie procesu “freeze-out” może nie być spełnione. DRAKE składa się z trzech specjalistycznych narzędzi do rozwiązywania równań Boltzmanna, które implementują: tradycyjnie stosowane równanie dla gęstości liczbowej ciemnej materii, równania przypominające przepływ cieczy, które łączą ewolucję gęstości liczbowej i rozproszenia prędkości oraz pełną numeryczną ewolucję rozkładu w przestrzeni fazowej. Autorzy omawiają trzy klasy modeli, w których decoupling kinetyczny i chemiczny są ze sobą

splecione w sposób, który wpływa ilościowo na obfitość reliktową: i) anihilacja ciemnej materii poprzez rezonans z wąskim zakresem energetycznym, ii) anihilacja z wzmocnieniem Sommerfelda, iii) "zakazana" anihilacja do stanów końcowych, które są kinematycznie niedostępne na progu utraty równowagi chemicznej. Praca pokazuje, że przyjęte tradycyjne podejście do przewidywania obfitości reliktywnej może dać wynik, który różni się nawet o rząd wielkości od poprawnej wartości. dr Hryczuk, wg oświadczeń miał jednoznacznie wiodący wkład w uzyskane wyniki i całą publikację.

Praca H6 to artykuł pt. "*Dark matter freeze-in from semi-production*", A. Hryczuk, M. Laletin, JHEP 06 (2021) 026. Artykuł opisuje nowy mechanizm produkcji ciemnej materii oparty na procesie "*freeze-in*" i zjawisku semi-produkcji (z ang. *semi-production*), czyli zjawisku odwrotnym do pół-anihilacji. Specyficzną cechą tego scenariusza odkrytą przez autorów jest to, że produkcja ciemnej materii jest tutaj tłumiona przez jej niską pierwotną obfitość. Zatem do uzyskania obfitości końcowej zgodnej z obserwacjami wymagane są znacznie większe wartości sprzężeń niż w przypadku standardowego freeze-in. Autorzy przedstawiają konkretny model, który wykorzystuje ten mechanizm produkcji ciemnej materii oraz omawiają jego szczegóły, w tym wpływ temperatury ciemnej materii na ewolucję jej gęstości. W dalszej części pracy porównują uzyskane wyniki z ograniczeniami na przestrzeń parametrów wynikającymi z poszukiwań pośrednich sygnałów ciemnej materii. Pokazują, że nawet jeśli ciemna materia nigdy nie była w pełni w równowadze termodynamicznej we wczesnym Wszechświecie, to może mieć obecnie duży przekrój czynny na samo-anihilację, który mógłby być wystarczający do emisji obserwowalnych sygnałów takiej anihilacji. Dr Hryczuk miał wiodący wpływ na powstanie przedstawionej pracy.

W artykule H7 "*Impact of dark matter self-scattering on its relic abundance*", A. Hryczuk, M. Laletin, Phys.Rev D106 (2022) no.2 023007, autorzy przeanalizowali wpływ samo-rozpraszania (z ang. *self-scattering*) ciemnej materii na jej gęstość reliktową. W przeciwieństwie do dotychczasowych założeń zauważają, że samo-rozpraszanie ma znaczący wpływ na procesy anihilacji ciemnej materii poprzez modyfikację jej rozkładu pędu. Przeanalizowali kilka scenariuszy "*freeze-out*" związanych z anihilacją w rezonansie oraz model z dodatkowym źródłem cząstek ciemnej materii pochodzących z rozpadów cięższego mediatora. Okazuje się, że w przypadku, gdy obliczenia wykonuje się na poziomie funkcji rozkładu pędu ciemnej materii, wprowadzenie dodatkowych energetycznych cząstek ciemnej materii do populacji termicznej może prowadzić do zmniejszenia jej końcowej obfitości.

Przedstawiona seria prac kandydata prezentuje się jako znaczący wkład w dziedzinę fizyki i fenomenologii ciemnej materii, zwłaszcza w aspektach związanych z procesami produkcji ciemnej materii we wczesnym i gorącym Wszechświecie. Dr Hryczak wnosi ten znaczący wkład przedstawiając nowe metody numeryczne pozwalające na dokładniejsze modelowanie procesów związanych z produkcją i ewolucją ciemnej materii w kosmosie. W szczególności, dr Hryczuk zajął się badaniem nowych scenariuszy produkcji ciemnej materii we wczesnym Wszechświecie, takich jak semi-produkcja i semi-anihilacja, a także wprowadził rozszerzenia do tradycyjnych modeli "*freeze-out*", które biorą pod uwagę samorozpraszanie ciemnej materii, co w niektórych przypadkach może znacząco wpłynąć na końcową jej gęstość. Dzięki tym badaniom kandydat zaprezentował nowe spojrzenie na procesy związane z materioogenezą ciemnej materii we wczesnym Wszechświecie i uzyskał wyniki oraz wnioski, które znacząco wykraczają poza dotychczasowe założenia. Jestem przekonany, że prace kandydata przedstawione jako osiągnięcie habilitacyjne przyczyniły się

do rozwoju tej dziedziny badań. **Toteż w mojej opinii opisana seria jednotematycznych publikacji kandydata wraz z jego pozostałymi publikacjami stanowią znaczące osiągnięcia naukowe wnoszące istotny wkład w dziedzinie fizyki ciemnej materii. Uważam, że wniosek dr Hryczuka w pełni spełnia wymogi ustawowe stawiane w postępowaniu habilitacyjnym i wnoszę o nadanie mu tego stopnia.**

Pozostałe osiągnięcia kandydata

Jako recenzent miałem również okazję zapoznać się z innymi osiągnięciami naukowymi i zawodowymi Pana doktora Andrzeja Hryczuka. Poza pracami, które kandydat zawarł w przekładanym osiągnięciu habilitacyjnym, jest on też współautorem 12 innych prac, napisanych po doktoracie. Zostały one opublikowane w wiodących międzynarodowych czasopiśmie z dziedziny. W chwili pisania tej recenzji, te 12 artykułów zgromadziło już 640 cytowań (wg. bazy NASA ADS), co jest znaczącym wynikiem w tej dziedzinie badań. Warty podkreślenia jest, że tematyka części z tych prac wykracza poza oryginalną tematykę badań dr Hryczuka i dotyczy modelowania min. potencjalnych sygnałów ciemnej materii pochodzących ze źródeł astrofizycznych. Jasno ilustruje to rozwój naukowy i poszerzanie horyzontów badawczych dr Hryczuka. **W mojej opinii, dorobek naukowy kandydata jest znaczący, zawiera również szereg dodatkowych osiągnięć, które jasno wskazują na uzyskaną przez niego samodzielność naukową.**

Dr Hryczuk osiągnął też znaczące sukcesy na polu krajowym w konkursach na projekty naukowe Narodowego Centrum Nauki. Zdobył finansowanie swoich autorskich projektów badawczych w konkursach SONATA i SONATA BIS. Niewątpliwie kierownictwo w projekcie z programu SONATA BIS pozwoli na dalszy rozwój zawodowy kandydata w zakresie tworzenia i kierowania zespołem badawczym. Pan dr Andrzej Hryczuk jest również członkiem Polskiego Towarzystwa Fizycznego. W swoim autoreferacie wskazuje na wygłoszenie 11 zaproszonych seminariów i referatów oraz 15 innych referatów i seminariów w okresie po uzyskaniu stopnia doktora. Wskazuje to, że kandydat jest aktywny zawodowo również na niwie związanej ze społecznością naukową w kraju i zagranicą. Trochę gorzej prezentuje się dorobek związany z udziałem w organizacji konferencji naukowych, dydaktyki oraz szeroko rozumianą popularyzacją nauki. Chociaż warte docenienia są niedawne działania kandydata w kierunku zwiększenia w tych kategoriach swoich osiągnięć, min. organizacja i koordynacja polskiej edycji słynnego cyklicznego wydarzenia popularyzującego badania o ciemnej materii pt. "Dark Matter Day".

Podsumowanie

Podsumowując, uważam, że przedstawione mi do recenzji osiągnięcie naukowe w postępowaniu habilitacyjnym Pana Andrzeja Hryczuka jest ważnym wkładem w dziedzinę badań nad fizyką i fenomenologią ciemnej materii. Kandydat wykazał się też solidną wiedzą w swojej dziedzinie oraz umiejętnością w prowadzeniu samodzielnych, ciekawych i nowatorskich badań naukowych. Jego ogólny dorobek naukowy jest znaczący jak na ten etap kariery i bez wątpliwości świadczy o znaczącym rozwoju naukowym i zawodowym kandydata. Przedstawione osiągnięcie habilitacyjne, tj. jednotematycznej serii prac pt. *"Precyzyjne wyznaczanie gęstości reliktovej ciemnej materii"* w mojej ocenie w pełni spełnia wymogi ustawowe stawiane osiągnięciom w postępowaniach o nadanie stopnia doktora

habilitowanego. Uważam, że wniosek kandydata, Pana Doktora Andrzeja Hryczuka w pełni spełnia ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane kandydatom do tego stopnia naukowego, dlatego też wnoszę o dopuszczenie dr Hryczuka do dalszych etapów postępowania habilitacyjnego.

Z poważaniem,

dr hab., prof. CFT PAN, Wojciech Hellwing