

Warszawa, 30 stycznia 2023 roku

Recenzja wkładu dr. Andrzeja Hryczuka ubiegającego się o nadanie stopnia doktora habilitowanego w rozwój dyscypliny nauki fizyczne.

Przedstawiono mi do oceny osiągnięcie naukowe w postaci cyklu siedmiu powiązanych tematycznie artykułów naukowych ([H1]-[H7]) będące podstawą ubiegania się o nadanie stopnia doktora habilitowanego. Osiągnięcie jest zatytułowane "Precyzyjne wyznaczenie gęstości reliktovej ciemnej materii", jego autorem jest dr Andrzej Hryczuk. Do wniosku o przeprowadzenie postępowania w sprawie nadania stopnia dołączono autoreferat liczący 39 stron, wykaz osiągnięć naukowych, deklaracje Habilitanta dotyczące jego wkładów do cyklu publikacji będących osiągnięciem naukowym oraz oświadczenia współautorów. Oświadczenia Habilitanta są jakościowo zgodne z oświadczeniami współautorów.

Ocena osiągnięcia naukowego

H1: "Relic density computations at NLO: infrared finiteness and thermal correction", M. Beneke, F. Dighera, A. Hryczuk, JHEP 1410 (2014) 045, arXiv:1409.3049, 24 cytowania.

Praca ta jest poświęcona skonstruowaniu systematycznej metody obliczania wkładów do prawej strony równania Boltzmanna (collision term) w przypadku konieczności uwzględnienia wyższych rzędów rachunku zaburzeń (NLO). Metody stosowane wcześniej załamywały się w wyższych rzędach i prowadziły do pojawiania się, zależnych od temperatury, rozbieżności podczerwonych. W tej fundamentalnej pracy pokazano, jak należy poprawnie obliczać termicznie uśredniony przekrój czynny w przybliżeniu NLO. Okazało się, że poprawny opis procesów rozpraszania uwzględniający, w temperaturowej teorii pola, poprawki od $T \neq 0$ prowadzi do rezultatów skończonych w podczerwieni.

H2: "Finite-temperature modification of heavy particle decay and dark matter annihilation", M. Beneke, F. Dighera, A. Hryczuk, JHEP 1609 (2016) 031, arXiv:1607.03910, 7 cytowań.

Praca H2 jest naturalną kontynuacją publikacji H1. Zastosowano w niej technikę OPE (Operator Product Expansion) do analizy rozpadu i anihilacji ciężkich cząstek w ośrodku termicznym o temperaturze niższej od m_{DM} .

H3: "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, arXiv:1706.07433, 95 cytowań.

Publikacja H3 jest, moim zdaniem, najbardziej doniosłym osiągnięciem dr. Hryczuka. Pokazano w niej, jak obliczać gęstość reliktową ciemnej materii w przypadkach, gdy odprzęga się ona kinetycznie od termicznego ośrodka przed odprzęgnięciem chemicznym. Okazało się, że istnieją scenariusze produkcji ciemnej materii, w których taka sytuacja zachodzi w sposób naturalny (np. rezonansowa anihilacja ciemnej materii). W pracy H3 pokazano, że można/trzeba wykorzystać nie tylko zerowy moment, ale również drugi moment równania Boltzmann'a. W ten sposób wyprowadzono układ równań Boltzmann'a, jedno dla gęstości energii, a drugie dla parametru, który, w przypadku równowagi staje się temperaturą. Jakiś czas temu, korzystałem z rezultatów publikacji H3 analizując, wspólnie z moim doktorantem, Mateuszem Duchem, rezonansową produkcję wektorowej ciemnej materii. Publikacja H3 okazała się bardzo przydatna, jeśli nie konieczna, do poprawnego opisu badanego przez nas zjawiska.

H4: "Improved bounds on Z_3 singlet dark matter", A. Hektor, A. Hryczuk, K. Kannike, JHEP 03 (2019) 204, arXiv:1901.08074, 26 cytowań.

W pracy H4 zbadano szczegółowo model ciemnej materii o symetrii Z_3 z zespolonym polem skalarnym, singletem grupy cechowania Modelu Standardowego. Zastosowano technikę opisu wczesnego odprzęgnięcia kinetycznego rozwiniętą w publikacji H3.

H5: "Dark matter Relic Abundance beyond Kinetic Equilibrium", T. Binder, T. Bringmann, M. Gustafsson, A. Hryczuk, Eur.Phys.J.C 81 (2021) 7, 577, arXiv:2103.01944, 23 cytowań.

W publikacji H5 opisano skonstruowany i udostępniony przez autorów program DRAKE (Dark matter Relic Abundance beyond Kinetic Equilibrium). Jest to pakiet procedur napisanych w Wolfram Language służących do rozwiązywania równania, lub układu sprzężonych równań Boltzmann'a (w przypadku wczesnego odprzęgnięcia kinetycznego) oraz do rozwiązywania pierwotnej wersji równania Boltzmann'a na funkcję rozkładu w przestrzeni fazowej.

H6: "Dark matter freeze-in from semi-production", A. Hryczuk, M. Laletin, JHEP 06 (2021) 026, arXiv:2104.05684, 9 cytowań.

W tej publikacji zbadano nowy mechanizm produkcji ciemnej materii, tzw. pół-produkcję, będącą wersją mechanizmu freeze-in. Tym razem kandydatem na ciemną materię są wzbudzenia zespolonego pola skalarnego z symetrią Z_3 . Taki scenariusz wymaga specjalnego traktowania, ponieważ w granicy znikającej gęstości początkowej ciemnej materii jej produkcja jest niemożliwa.

Oznacza to, że konieczne jest zastosowanie układu sprzężonych równań Boltzmanna wprowadzonych wcześniej w pracy H3.

H7: "Impact of dark matter self-scattering on its relic abundance", A. Hryczuk, M. Laletin, Phys.Rev D106 (2022) no.2 023007, arXiv:2204.07078, 2 cytowania.

W tej ciekawej publikacji zaimplementowano, po raz pierwszy w literaturze, mechanizm samo-rozproszenia ciemnej materii w pierwotnym równaniu Boltzmanna w przestrzeni fazowej. Sprawdzono, jak samo-rozpraszanie, zwykle pomijane, modyfikuje rozkład energii CM i ostatecznie jej gęstość reliktową dla trzech różnych modeli ciemnej materii z silną zależnością procesów anihilacji od prędkości.

Podsumowując moją ocenę przedstawionego osiągnięcia naukowego stwierdzam, że stanowi ono cykl interesujących, wartościowych i powiązanych tematycznie publikacji naukowych. Elementem łączącym przedstawione publikacje jest chęć precyzyjnego opisu mechanizmów produkcji oraz dokładne wyznaczenie gęstości reliktovej ciemnej materii. Bez wątpienia jest to istotne zagadnienie. Wszystkie prace zostały opublikowane w renomowanych czasopismach naukowych, a najważniejsze z nich (H1 i H3) zostały zdecydowanie zauważone i docenione przez środowisko badaczy zajmujących się kosmologią cząstkową.

Ocena aktywności naukowej

Poza osiągnięciem naukowym opisanym powyżej, Habilitant przedstawił listę „głównych” publikacji z podziałem na przed i po doktoracie, oraz listę pozostałych publikacji. W sumie dr. Hryczuk opublikował 20 prac¹ w renomowanych czasopismach: JHEP (10), PRD (4), JCAP (1), EJP (1), PLB (1), etc.. Łączna liczba cytowań jego prac (bez autocytowań) to 820, a indeks Hirscha 15. Najwyżej cytowana (197) praca C7 to wielo-autorski opis eksperymentu e-ASTROGAM, inna doświadczalna publikacja (C1) była cytowana 111 razy. Wśród pozostałych największą popularność zdobyły: P11 (124 cytowania), opublikowana w 2011, P8 (107 cytowań), opublikowana w 2014 i H3 (95 cytowań) opublikowana w 2017. H3 wchodzi w skład recenzowanego osiągnięcia naukowego. Biorąc pod uwagę wiek Habilitanta jest to bardzo solidny dorobek. Niektóre z jego prac weszły do kanonu fizyki ciemnej materii, na przykład dotyczy to pracy H3 poświęconej "early kinetic decoupling" opublikowanej zaledwie w 2017.

Do wykazu osiągnięć naukowych dołączona jest lista „zaproszonych” i „pozostałych” referatów konferencyjnych i innych, która pokazuje Habilitanta jako aktywnego i rozpoznawalnego na świecie badacza.

Dr Hryczuk uzyskał stopień magistra na Uniwersytecie Warszawskim w 2007 roku, następnie doktoryzował się w międzynarodowej szkole doktorskiej SISSA w Trieście pod opieką Piero Ullio. w 2012 roku. W latach 2012-2015 był na stażu

¹Dane bibliograficzne na podstawie bazy danych iNSPIRE.

podoktorskim w Uniwersytecie Technicznym w Monachium, a w latach 2015-2018 na stażu w Uniwersytecie w Oslo współpracując z prof. Torstenem Bringmannem. Publikacja H3 ukazała się podczas pobytu Habilitanta w Oslo. Oba te uniwersytety to szanowane w środowisku kosmologii cząstkowej ośrodki badawcze. Wspomniane doświadczenia międzynarodowe jednoznacznie pokazują, że Habilitant wykazał się istotną aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej uczelni.

Przy okazji warto zwrócić uwagę, że Habilitant jest całkowicie dojrzałym i niezależnym badaczem; ze swoim promotorem, prof. Ullio, opublikował jedynie 2 artykuły, niewiele więcej prac ma z prof. Bringmannem. Od dawna sam dobiera sobie współpracowników i tematy badań.

Dr Hryczuk kieruje dwoma projektami finansowanymi przez NCN:

- SONATA grant 2018/31/D/ST2/00813, "Wpływ efektów nierównowagowych i termicznych na ewolucje Ciemnej Materii w plazmie Wczesnego Wszechświata",
- SONATA BIS grant 2021/42/E/ST2/00009, "Ciemna materia i bariogeneza w wielokładnikowych ciemnych sektorach oraz rozszerzonych modelach kosmologicznych".

Oznacza to, że od powrotu z Oslo w 2018 roku, aż do roku 2027 Habilitant ma zapewnione finansowanie prowadzonych przez siebie badań.

Chciałbym również dodać, mimo, że nie podlega to ocenie w procesie habilitacyjnym, że dr Hryczuk jest zaangażowany w popularyzację fizyki, wielokrotnie brał udział w audycjach radiowych bądź wydarzeniach internetowych popularyzujących kosmologię. Habilitant prowadził również zajęcia dydaktyczne, np. Mechanika klasyczna i szczególna teoria względności, ćwiczenia (Uniwersytet Warszawski, wiosna 2019), mimo że nie leżało to w obszarze jego obowiązków.

Podsumowanie

Przedstawione do recenzji osiągnięcie jest oryginalnym rozwiązaniem postawionych zadań badawczych i w pełni spełnia wymagania określone w art. 219 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. W szczególności uważam, że przedstawiony cykl publikacji stanowi istotny wkład w rozwój dyscypliny nauki fizyczne. Stwierdzam ponadto, że Habilitant wykazał się również istotną aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej uczelni. Z przyjemnością wnoszę o nadanie dr. Andrzejowi Hryczukowi stopnia doktora habilitowanego.

prof. dr hab. Bohdan Grządkowski