

dr hab. Maciej Bilicki, prof. CFT PAN
Centrum Fizyki Teoretycznej
Polska Akademia Nauk
al. Lotników 32/46
02-668 Warszawa
bilicki@cft.edu.pl

Ocena osiągnięcia naukowego
„Rola progenitorów fal grawitacyjnych we Wszechświecie”
oraz aktywności naukowej i pozostałego dorobku, przedstawionych w
postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego dla
dr Doroty Szécsi.

1. Podstawowe informacje o Kandydatce.

Pani dr Dorotta Szécsi uzyskała licencjat (2010) oraz magisterium (2012) z fizyki na Uniwersytecie Loránda Eötvösa w Budapeszcie (Węgry) za badania nad rozbłyskami gamma, w obu przypadkach pod opieką dr. Zsolta Bagoly. Pracę doktorską pt. „The evolution of low-metallicity massive stars” Kandydatka napisała w 2016 r. pod kierunkiem prof. Norberta Langera w Argelander-Institut für Astronomie, Bonn (Niemcy), uzyskując stopień doktora astrofizyki 4 lipca 2016 r. Następnie pracowała jako postdoc lub adiunkt kolejno w Argelander-Institut für Astronomie (3 miesiące w 2016), Instytucie Astronomii Czeskiej Akademii Nauk (1 rok w 2016-17), na Uniwersytecie Birmingham w Wlk. Brytanii (1,5 roku w 2017-19), Uniwersytecie w Kolonii (Niemcy) jako stypendystka von Humboldta (2,5 roku w 2019-21), zaś od października 2020 jest adiunktem w Instytucie Astronomii na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu.

Dr Szécsi jest (współ)autorką 31 recenzowanych publikacji (wg bazy NASA ADS na dzień 9 lutego 2024), łącznie cytowanych 1310 razy (1209 razy bez autocytowań) oraz podobnej liczby prac nierecenzowanych. Artykuły recenzowane autorstwa Habilitantki ukazywały się w większości w najlepszych czasopismach z dziedziny: ApJ, A&A, MNRAS. Indeks Hirscha Kandydatki wynosi 16 wg tej samej bazy.

2. Ocena osiągnięcia habilitacyjnego zgłoszonego przez Kandydatkę.

Jako główne osiągnięcie naukowe w postępowaniu habilitacyjnym, dr Szécsi zgłosiła cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych pt. „Rola progenitorów fal grawitacyjnych we Wszechświecie”. Cykl ten składa się z pięciu publikacji wieloautorskich (od 2 do 10 autorów),

przy czym w trzech z nich (Hab1, Hab3, Hab4) dr Szécsi jest pierwszą autorką, a w dwóch (Hab2, Hab5) jest drugą autorką. Prace te są recenzowane i ukazały się w czasopiśmie należących do najbardziej znaczących w dziedzinie: *Astronomy & Astrophysics*, IF=6.5; *Monthly Notices of the RAS*, IF=4.8; *Astrophysical Journal*, IF=4.9.

Zgodnie z oświadczeniami Kandydatki oraz jej współautorów, dr Szécsi miała dominujący wkład w publikacje, gdzie występuje jako pierwsza autorka. W przypadku Hab2 oraz Hab5, Habilitantka występuje na drugim miejscu, lecz deklaruje „dzielenie pierwszego autorstwa” z każdą z odpowiednich pierwszych autorek (dr Agrawal, dr Kubatova). W przypadku Hab5 jest to zgodne z oświadczeniem pierwszej autorki dr Kubatovej. Jeśli chodzi o pracę Hab2, z załączonego oświadczenia dr Agrawal trudno jednoznacznie wnioskować o takim „dzielonym pierwszym autorstwie”. Muszę dodatkowo zauważyć, że ta sama publikacja została zgłoszona przez dr Agrawal jako podstawa rozdziału 2 w jej pracy doktorskiej¹. Co więcej, widzę też pewną niespójność względem oświadczenia dr Agrawal tam się znajdującego; mianowicie, dr Agrawal w swojej rozprawie doktorskiej oświadcza: *„Data Analysis and drafting of this chapter was done jointly by Dorottya Szécsi and myself. I have also made all the figures and tables accounting for 70 percent of the total work.”*

Zgłoszony przez dr Szécsi cykl prac dotyczy ważnej gałęzi badań współczesnej astrofizyki, mianowicie powstawania, ewolucji i ostatecznych losów gwiazd, które mogą być progenitorami podwójnych obiektów zwartych – źródeł fal grawitacyjnych, rejestrowanych przez obserwatorium LIGO/Virgo/KAGRA (LVK). W szczególności, LVK wykrywa przede wszystkim układy podwójnych czarnych dziur o masach zazwyczaj przekraczających te, które osiągają pozostałości po gwiazdach tzw. populacji I i II – czyli po gwiazdach najmłodszych generacji i o metaliczności zbliżonej lub nieznacznie mniejszej od słonecznej. Pochodzenie tak masywnych czarnych dziur nadal nie jest jednoznacznie wyjaśnione. Wśród ich możliwych poprzedników (*progenitorów*) mogą być istniejące w młodym Wszechświecie gwiazdy tzw. populacji III (czy też pierwszej generacji), o bardzo niskiej metaliczności i mogące osiągać bardzo duże masy w momencie powstawania. Takie gwiazdy istniały bardzo krótko i nie ma ich już w naszej Galaktyce ani pobliskim Wszechświecie, więc ich badanie jest jak na razie głównie domeną teoretyków. Habilitantka ma znaczący wkład w rozwój tego rodzaju teoretycznych badań.

W przedstawionym osiągnięciu habilitacyjnym, dr Szécsi zajmuje się modelowaniem masywnych gwiazd, w tym o niskiej metaliczności, w różnych warunkach otoczenia, i ich powiązaniem z wybuchami supernowych, rozbłyskami gamma i generowaniem fal grawitacyjnych. Znaczącym wynikiem w tym zakresie jest siatka modeli ewolucyjnych „BoOST”, zaprezentowana w publikacji Hab1. Szczególną uwagę poświęca Kandydatka roli nadolbrzymów w gromadach kulistych (Hab3, Hab4), choć muszę zauważyć, że prace te dotyczą w dużej mierze powstawaniu gwiazd drugiej generacji o mniejszych masach. Ważnym aspektem zaprezentowanego osiągnięcia naukowego jest też testowanie różnych modeli

1 Dostępna na https://researchbank.swinburne.edu.au/file/a89d4367-90a1-4cdc-a3a0-6babb963193a/1/Poojan_Agrawal_Thesis.pdf

masywnych gwiazd (Hab2) oraz przewidywanie ich własności z obserwacyjnego punktu widzenia (Hab5). Dodatkowo, dr Szécsi miała swój udział w rozwijaniu pakietów numerycznych do takiego modelowania, jak METISSE czy COMPAS.

Poniżej omówię prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego dr Szécsi:

Hab1. Szécsi, D., Agrawal, P., Wünsch, R., Langer, N.: *'Bonn' Optimized Stellar Tracks (BoOST). Simulated Populations of Massive and Very Massive Stars as Input for Astrophysical Applications*, A&A 658, A125 (2022).

Praca przedstawia siatki modeli ewolucyjnych gwiazd, wraz z gęsto interpolowanymi sekwencjami i syntetycznymi populacjami gwiazd o masach 9-500 M_{\odot} i metaliczności od słonecznej do 1/250 Z_{\odot} . Modele gwiazd zostały obliczone za pomocą kodu ewolucyjnego „Bonn” ze spójnymi założeniami fizycznymi i obejmowały fazy spalania wodoru i helu w jądrze. Interpolację i syntezę populacji przeprowadzono za pomocą nowo opracowanej procedury SYNSTARS. Osiem siatek reprezentuje wolno rotujące masywne gwiazdy o klasycznej ścieżce ewolucyjnej, podczas gdy jedna siatka odpowiada modelom chemicznie jednorodnym o szybkiej rotacji. Siatki zawierają dane dotyczące właściwości wiatru gwiazdowego, takie jak szacowana prędkość i energia kinetyczna wiatru, a także typowe parametry gwiazd, jak masa, promień, temperatura powierzchni, jasność, tempo utraty masy i obfitość powierzchniowa 34 izotopów. Autorzy szacują również masy helu i jądra węglowo-tlenowego do obliczania masy pozostałości gwiazdnych. Wszystko to składa się na projekt Bonn Optimized Stellar Tracks (BoOST), którego wyniki publikowane są w postaci tabel, zawierających modele gwiazd, interpolowane ścieżki i populacje syntetyczne. Dzięki uwzględnieniu szerokiego zakresu mas i metaliczności, modele ewolucji masywnych gwiazd zawarte w BoOST można stosować do dalszych badań, np. nad powstawaniem gwiazd w galaktykach na różnych przesunięciach ku czerwieni. Praca ta jest niewątpliwie największym osiągnięciem dr Szécsi spośród pięciu publikacji stanowiących osiągnięcie habilitacyjne, o czym świadczy liczba cytowań (30 na dzień 9 lutego 2024 wg NASA ADS). Szczególnie docenić należy publiczne udostępnienie danych będących wynikiem tych badań.

Hab2. Agrawal, P.; Szécsi, D.; Stevenson, S.; Hurley, J.: *Explaining the differences in massive star models from various simulations*, MNRAS Vol.512, Issue 4, pp.5717-5725 (2022)

Publikacja porównuje pięć zestawów modeli masywnych gwiazd, pochodzących z symulacji BPASS, BoOST, Geneva, MIST i PARSEC, przy metaliczności bliskiej słonecznej. Modele te zostały obliczone przy nieco różniących się założeniach co do tempa utraty masy i mieszania wewnętrznego. Co więcej, wykorzystują one różne metody w celu przezwyciężenia trudności numerycznych wynikających z obecności inwersji gęstości w zewnętrznych warstwach gwiazd masywniejszych niż 40 M_{\odot} . Te inwersje wynikają z połączenia nieefektywnej konwekcji w otoczkach masywnych gwiazd o niskiej gęstości i nadwyżki jasności radiacyjnej w stosunku do jasności Eddingtona. Autorzy stwierdzili, że pomiędzy pięcioma zestawami symulacji promieniowanie jonizujące uwalniane przez populacje gwiazd może zmieniać się nawet o 18 procent, maksymalna ekspansja radialna gwiazdy może się mieścić w zakresie od 100 do 1600 R_{\odot} , a masa pozostałości gwiazdnej może różnić się nawet o 20 M_{\odot} . Głównym wnioskiem z tej pracy jest konieczność zachowania ostrożności przy próbach wyjaśnienia obserwacji, gdy korzysta się z modeli gwiazd masywniejszych

niż 40 M_{\odot} . Praca ta jest ważnym przyczynkiem do badania masywnych gwiazd i pokazuje jakimi niepewnościami obarczone są ich obecne modele. Stanowi ona znaczący wynik dla dziedziny, choć jak wspomniałem wcześniej, trudno mi jednoznacznie określić stopień wkładu dr Szécsi w tę analizę (choć nie wątpię, że był on duży).

Hab3. Szécsi, D. and Wünsch, R.: *Role of supergiants in the formation of globular clusters*, ApJ 871, 20 (2019).

W pracy badana jest rola chłodnych nadolbrzymów w powstawaniu różnych populacji gwiazd w gromadach kulistych. Autorzy połączyli dwie metody: modelowanie ewolucji masywnych gwiazd i hydrodynamiczne obliczenia struktury gazu w gromadzie. Takie podejście pozwoliło im zbadać w jaki sposób powstawanie gwiazd w młodych masywnych gromadach zależy od energii i masy pierwszej generacji gwiazd, oraz jaki powinien być skład chemiczny drugiej generacji. Stwierdzono, że obecność masywnych (9-500 M_{\odot}) nadolbrzymów ubogich w metale w młodej gromadzie prowadzi do epizodu formowania się gwiazd w ciągu pierwszych 4 milionów lat istnienia gromady, zanim wybuchną pierwsze supernowe typu II lub gaz zostanie wyrzucony. Wiatry gwiazdowe kondensują się w centrum gromady, co prowadzi do powstania tam drugiej generacji gwiazd o zmiennych obfitościach O i Na, zgodnie z obserwacjami. Podobnie jak w innych scenariuszach obejmujących masywne gwiazdy, obfitość helu jest wyższa niż wynika to z obserwacji. Zakładając dynamiczne usuwanie gwiazd z obrzeży gromady lub stosując początkową funkcję mas typu *top-heavy*, autorzy przewidują udział gwiazd drugiej generacji na poziomie 20%-80%. Wpływ metaliczności okazuje się być istotny, ponieważ najjaśniejsze nadolbrzymy są przewidywane tylko przy niskiej metaliczności, co ogranicza - ale nie wyklucza - ilość gwiazd drugiego pokolenia o wysokiej metaliczności. Ponieważ te masywne gwiazdy stają się czarnymi dziurami, prowadzi to do wniosku, że gromady kuliste mogą być miejscem, w których znajdują się progenitory fal grawitacyjnych. Co więcej, autorzy przewidują korelację między masą gromady a zakresem zjawiska „wielu populacji” (multiple-population). Przedstawione tu przez dr Szécsi i jej współautora wyniki dotyczą istotnych i ciekawych kwestii, jakimi jest powstawanie gwiazd w młodych gromadach kulistych w obecności nadolbrzymów (gwiazd masywnych). Znacząca dla dziedziny jest też sugestia, że to w takich gromadach mogą się znajdować źródła fal grawitacyjnych, choć zapewne długo jeszcze będziemy musieli poczekać, by zostało to zweryfikowane obserwacyjnie.

Hab4. Szécsi, D., Mackey, J. and Langer, N.: *Supergiants and their shells in young globular clusters*, A&A 612, A55 (2018).

Celem pracy było przedstawienie i zbadanie ciekawego scenariusza, w którym druga generacja „zanieczyszczonych” gwiazd o niskiej masie może powstawać w otoczkach wokół chłodnych nadolbrzymów w młodej gromadzie kulistej. Autorzy przeprowadzili symulację takiej otoczki, zbadali jej stabilność i przeanalizowali skład. Stwierdzili, że otoczka jest niestabilna grawitacyjnie w skali czasowej krótszej niż czas życia nadolbrzyma, a masa Bonnora-Eberta obszarów o zwiększonej gęstości jest wystarczająca, aby umożliwić powstawanie tam gwiazd. Ponieważ gwiazdy o niskich masach powstają w takiej otoczce z materiału utraconego z nadolbrzyma, ich skład z konieczności odzwierciedla skład wiatru masywnej gwiazdy. Jako że wiatr zawiera produkty spalania gorącego wodoru, gwiazdy powstałe w otoczce charakteryzują się bardzo podobnymi anomaliami obfitości, co obserwowane w gwiazdach drugiej generacji gromad kulistych. Podstawowym wnioskiem pracy jest stwierdzenie, że w gromadach kulistych w otoczkach wokół chłodnych nadolbrzymów mogą się tworzyć gwiazdy drugiej generacji o niskiej masie. Nawet bez obecności otoczki ograniczonej fotojonizacją, chłodne nadolbrzymy o

przewidywanej niskiej metaliczności mogą przyczynić się do zanieczyszczenia ośrodka międzygwiazdowego gromady, z czego powstawać mogą gwiazdy drugiej generacji. Tak więc chłodne nadolbrzymy powinny być postrzegane jako ważny czynnik przyczyniający się do ewolucji gromad kulistych. Ta praca, choć chronologicznie wcześniejsza niż Hab3, jest tamtej „uszczerbowieniem”, gdyż dotyczy powstawania gwiazd w gromadach kulistych, ale w bardzo specyficznych warunkach, jakimi są otoczki nadolbrzymów. Pokazanie przez dr Szécsi i współautorów, że jest to możliwe, uważam za ważny i ciekawy wynik. Z drugiej strony, publikacja ta nie dotyczy bezpośrednio ewolucji bardzo masywnych gwiazd (przypuszczalnych progenitorów fal grawitacyjnych), lecz raczej ich roli w powstawaniu gwiazd późniejszych generacji.

Hab5. Kubátová, B.; Szécsi, D.; Sander, A. A. C.; Kubát, J.; Tramper, F.; Krτίčka, J.; Kehrig, C.; Hamann, W.-R.: *Low-metallicity massive single stars with rotation. II. Predicting spectra and spectral classes of chemically homogeneously evolving stars*, A&A, 623, A8 (2019)

W publikacji przebadano przewidywania najnowocześniejszych teorii ewolucji gwiazd oraz ich atmosfer dla specyficznych ubogich w metale ($0,02 Z_{\odot}$) gorących masywnych gwiazd, o chemicznie jednorodnej ewolucji, które nazwano gwiazdami Transparent Wind Ultraviolet INTense (TWUIN). Autorzy wyliczyli syntetyczne widma dla szerokiego zakresu mas ($20-130 M_{\odot}$) i kilku etapów ewolucji, od wieku zero na ciągu głównym do spalania helu w jądrze. Zbadano wpływ utraty masy i kondensacji wiatru na widma i sklasyfikowano spektra w systemie Morgana-Keenana. Stwierdzono, że gwiazdy TWUIN nie wykazują prawie żadnych linii emisyjnych przez większość fazy spalania wodoru. Większość linii metali, w tym azotu, jest całkowicie nieobecna. Podczas etapu spalania helu w jądrze pojawiają się linie emisyjne, a nawet wykrywano linie niektórych metali (tlenu i węgla), ale nadal prawie nie ma azotu. Utrata masy i kondensacja wiatru odgrywają znaczącą rolę w powstawaniu linii w późniejszych fazach ewolucji, szczególnie podczas spalania helu w jądrze. Większość uzyskanych przez autorów widm odpowiada nadolbrzymom lub olbrzymom wczesnego typu O, a w fazie spalania helu w jądrze - gwiazdom Wolfa-Rayeta typu WO. Autorzy wnioskują, że bardzo gorące gwiazdy wczesnego typu O w galaktykach o niskiej metaliczności mogą być wynikiem ewolucji jednorodnej chemicznie, a zatem mogą one być prowadzić do długich rozbłysków gamma lub supernowych typu Ic. Co więcej, gwiazdy TWUIN mogą odgrywać ważną rolę w rejonizacji Wszechświata, ponieważ są gorące i nie wykazują wyraźnych linii emisyjnych przez większość swojego istnienia. Ta szczegółowa analiza widm specyficznych gwiazd, będących głównym obiektem zainteresowania dr Szécsi, daje konkretne przewidywania, które będą stopniowo weryfikowane wraz z postępem technik obserwacyjnych. Praca ta przedstawia ważne dla dziedziny wyniki, które niewątpliwie przyczynią się do lepszego zrozumienia znaczenia masywnych gwiazd ubogich w metale.

W ramach podsumowania tej części mojej oceny stwierdzam, że wyniki przedstawione w publikacjach Hab1-Hab5, składających się na cykl prac zgłoszonych jako osiągnięcie naukowe Habilitantki, bez wątpienia pokazują jej znaczny wkład w rozwój dyscypliny. Indywidualny wkład dr Szécsi w te prace jest bez wątpienia dominujący lub duży, nawet mimo pewnych wątpliwości co do stopnia jej kontrybucji w publikacji Hab2. Przedstawione tu osiągnięcie naukowe uważam zatem za spełniające formalne wymogi do nadania Kandydatce stopnia doktora habilitowanego.

3. Ocena aktywności naukowej Kandydatki.

Na początek ogólnej oceny aktywności naukowej dr Szécsi warto wspomnieć, że oprócz badań nad gwiazdami masywnymi i/lub o małej metaliczności, których dotyczy osiągnięcie habilitacyjne, była ona również zaangażowana w badania dotyczące rozbłysków gamma. Związane z tym publikacje (recenzowane i konferencyjne) ukazały się w większości przed uzyskaniem doktoratu przez Kandydatkę, ale znajdujemy też i późniejsze (np. Horvath i in. 2020). Patrząc bardziej ogólnie, Habilitantka wykazuje się ożywioną aktywnością naukową, czego dowodem jest ponad 30 publikacji recenzowanych z jej współautorstwem, i prawie drugie tyle nierecenzowanych (doniesień konferencyjnych itp.). Prace te są wynikiem współpracy Kandydatki z naukowcami z wielu krajów świata.

Kariera naukowa dr Szécsi realizowana była w kilku ośrodkach w Europie, począwszy od instytucji na Węgrzech, następnie w Niemczech, Czechach, Wielkiej Brytanii, i wreszcie w Polsce. Warto wspomnieć o licznych wizytach roboczych w krajach europejskich (i jednej w USA), przy czym zauważalna jest przerwa od początku pandemii, trwająca aż do kwietnia 2023. Wyniki swojej działalności naukowej dr Szécsi prezentowała na wielu konferencjach: we wniosku wymienione jest 7 prezentacji zaproszonych i dodatkowo 18 „zwykłych” (*contributed*). Kandydatka udokumentowała również aż 45 wygłoszonych przez nią seminariów w wielu krajach. Dr Szécsi otrzymała także 2 stypendia Humboldta, zaś od lutego 2022 prowadzi jako kierowniczka grantu projekt badawczy Opus przyznany jej przez NCN. To wszystko pokazuje, że jest ona samodzielną i dojrzałą badaczką.

Podsumowując tę część, stwierdzam iż dr Szécsi wykazuje się istotną aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej instytucji naukowej, w szczególności zagranicznej, dzięki czemu Kandydatka spełnia warunek konieczny do nadania stopnia doktora habilitowanego.

4. Charakterystyka dorobku dydaktycznego, organizacyjnego i popularyzatorskiego Kandydatki.

Dr Szécsi może się również pochwalić zauważalnym dorobkiem dydaktycznym, organizacyjnym i popularyzatorskim. Na przestrzeni lat prowadziła wykłady dla studentów, (współ)opiekowała się magistrantami i doktorantami, a także służyła jako mentorka. W związku z realizacją grantu NCN, Habilitantka prowadzi obecnie grupę badawczą zajmującą się progenitorami fal grawitacyjnych. Brała również udział w organizacji kilku konferencji i warsztatów. Należy też do dwóch konsorcjów pracujących nad proponowanymi projektami obserwacyjnymi (GAMOW, THESEUS). Dr Szécsi była także recenzentką artykułów naukowych w A&A, MNRAS i Science, choć muszę zauważyć, że ich liczba (6 łącznie) jest niewielka, biorąc pod uwagę ponad 7 lat, które upłynęło między jej doktoratem a momentem wysłania recenzowanego wniosku habilitacyjnego. Z drugiej strony, docenić należy udział Kandydatki w panelach oceniających wnioski obserwacyjne na teleskopy Hubble’a i Jamesa Webba. Habilitantka nie stroni również od popularyzacji, udzielając się w tym zakresie

zarówno w ojczystych Węgrzech, jak i w Wielkiej Brytanii. Zauważam też dwie nagrody przyznane p. Szécsi, jedną jeszcze podczas studiów magisterskich, a drugą niedługo po doktoracie. Podsumowując, Kandydatka ma istotny i adekwatny do jej etapu kariery dorobek dydaktyczny, organizacyjny i popularyzatorski.

5. Konkluzja.

Zarówno osiągnięcie habilitacyjne dr Szécsi, jakim jest cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych pt. „Rola progenitorów fal grawitacyjnych we Wszechświecie”, oraz jej aktywność naukową realizowaną w więcej niż jednej instytucji naukowej, w tym zagranicznej, należy ocenić zdecydowanie pozytywnie. W konkluzji zatem stwierdzam, że przedstawione przez Habilitantkę osiągnięcia naukowe oraz jej pozostały dorobek, spełniają ustawowe i zwyczajowe wymagania do nadania stopnia doktora habilitowanego.

Maciej Bilicki