



ul. Bartycka 18, 00-716 Warszawa  
tel: (22) 841 00 41, (22) 3296 100  
fax: (22) 841 00 46  
email: camk@camk.edu.pl  
http://www.camk.edu.pl

CENTRUM ASTRONOMICZNE IM. MIKOŁAJA KOPERNIKA PAN

20 lutego 2024

Recenzja osiągnięcia naukowego będącego podstawą ubiegania się o nadanie stopnia doktora habilitowanego pt.

*Rola progenitorów fal grawitacyjnych we Wszechświecie*

autorstwa **Dr Doroty Szésci.**

Osiągnięcie naukowe Dr Doroty Szésci będące podstawą do ubiegania się o nadanie stopnia doktora habilitowanego, które w dalszej części recenzji będę nazywał „rozprawą habilitacyjną” albo po prostu „rozprawą” składa się z pięciu artykułów naukowych, których trzech kandydatka jest pierwszym autorem a drugim autorem w dwóch pozostałych. Odnosząc się do tych ostatnich Dr Szésci wspomina o „dzieleniu pierwszego autorstwa” ale nie jest to pojęcie używane w ocenie osiągnięć naukowych w dziedzinie astrofizyki więc będę przyjmował, że jest autorem drugim. Wróć do tego pod koniec mojej recenzji. Trzy artykuły zostały opublikowane w *Astronomy & Astrophysics* a dwa pozostałe, po jednym, w *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* i w *Astrophysical Journal*, czyli, wbrew klasyfikacji polskiego Ministerstwa Szkolnictwa Wyższego, w trzech najważniejszych na świecie czasopismach astronomicznych. Opublikowane w ostatnich sześciu latach, artykuły wchodzące w skład rozprawy, według ADS, były w sumie cytowane 96 razy (88 razy odejmując autocytaty) co jest zupełnie przyzwoitym wynikiem, wzięwszy pod uwagę raczej wyspecjalizowany charakter publikacji HAB3, HAB4 i HAB5. Od czasu ukończenia pracy doktorskiej w 2016 roku, dr Szésci opublikowała 27 prac w pismach recenzowanych. Jedynie trzy z nich są pierwszoautorskie. To onewchodzą w skład recenzowanego osiągnięcia naukowego

Tytuł rozprawy nie odpowiada dokładnie jej treści, ale tytuł właściwy, np. „Pewne zagadnienia astrofizyki gwiazd masywnych, ze szczególnym uwzględnieniem własności gwiazd ubogich w metale” brzmiałby oczywiście mniej efektownie od przyjętego przez autorkę. Taki tytuł nie zmniejszałby wartości naukowych rozprawy bo zajmując się szczegółowym badaniem własności

pojedynczych gwiazd masywnych i bardzo masywnych i budowaniem ich modeli, oraz krytyczną produkcją narzędzi pozwalających realistycznie (z punktu widzenia czasu komputerowego) opisać ich ewolucję i populację, Dr Szésci przyczynia się pośrednio do zrozumienia niektórych klas potencjalnych składników źródeł fal grawitacyjnych, gdyż by móc badać ich rolę we Wszechświecie należy najpierw zrozumieć własności gwiazd masywnych, szczególnie tych o małej zawartości metali. Dodam tylko, że użycie słowa „progenitor” w tytule nie jest dobrym pomysłem, ale to nie wina autorki, tylko jej językowych doradców. Nie ma w języku polskim słowa „prognitor” (jest „progenitura”, ale ma znaczenie przeciwne do zamierzonego w tym przypadku). „Przodek” albo „protoplasta” są słowami odpowiednimi w tym kontekście. Ponieważ, zgodnie z przepisami, piszę tę recenzję po polsku, odnosi się ona do tekstu omówienia osiągnięć napisanego w tym języku.

Detekcja, w 2015 roku, fal grawitacyjnych niezwykle wzmocniła zainteresowanie uczonych gwiazdami masywnymi szczególnie tymi, których zawartość metali jest dużo niższa od słonecznej. Okazało się bowiem, że zgodnie z, opublikowanymi już w 2010 roku, przewidywaniami Krzysztofa Belczyńskiego i współpracowników, masy zlewających się czarnych dziur obserwowanych przez interferometry LIGO i Virgo sięgają kilkudziesięciu mas Słońca. Jeśli wspomniane czarne dziury powstawały w wyniku ewolucji izolowanych układów podwójnych gwiazd masywnych, przodkami takich obiektów mogły być tylko gwiazdy o małej zawartości metali, których stosunkowo nieskuteczna, wiatrowa utrata masy pozostawia w końcu ewolucji bardzo masywne jądra, które następnie staną się czarnymi dziurami.

Obserwacje fal grawitacyjnych emitowanych przez zlewające się ciała zwarte w ilościach pozwalających na badania statystyczne, stworzyła zapotrzebowanie na szybkie kody numeryczne pozwalające na modelowanie populacji wielu milionów układów podwójnych w rozsądnym, komputerowo, czasie. Kody takie istniały już od połowy lat dziewięćdziesiątych XX w., ale odkrycie fal grawitacyjnych spowodowało ich modyfikację i powstanie nowych. Obecnie istnieje ich kilkanaście. Kody syntezy populacji przybliżają ewolucję każdej gwiazdy, wykorzystując wzory analityczne lub tabele opisujące własności gwiazd pojedynczych, w oparciu o siatki uprzednio obliczonych szczegółowych modeli pojedynczych gwiazd. Dopiero potem uwzględnia się efekty oddziaływań między składnikami, które też są modelowane w sposób przybliżony. Należy przy tym dodać, że przeważająca ilość gwiazd masywnych powstaje w układach podwójnych, co jest, o dziwo, w omówieniu osiągnięć, przez dr Szésci przemilczane.

Z drugiej strony, istnieją kody numeryczne, które strukturę i ewolucję gwiazd opisują szczegółowo i w sposób fizycznie spójny, gdy jest to możliwe. Policzenie ścieżek ewolucyjnych przez takie kody jest zbyt numerycznie kosztowne, by mogły służyć bezpośrednio do syntezy populacji gwiazdowych, a w szczególności populacji gwiazd podwójnych. Kody te, natomiast, służą do opracowania metod przybliżonych stosowanych w kodach syntezy, ale oczywiście mają wiele innych

zastosowań przy porównywaniu modeli gwiazd z obserwacjami. Najbardziej popularnym obecnie modelem jest ogólnie dostępny kod MESA. Należy też do nich ewolucyjny kod z Bonn, znany głównie z gęstej siatki reakcji jądrowych. Jest on wykorzystany w pracy HAB1.

Publikacja HAB1, pt. *Bonn Optimized Stellar Tracks (BoOST). Simulated Populations of Massive and Very Massive Stars as Input for Astrophysical Applications* przedstawia dziewięć siatek sekwencji modeli ewolucyjnych gwiazd, wraz z drobno rozdzielonymi interpolowanymi sekwencjami i syntetycznymi populacjami gwiazd o masach od 9 do 500  $M_{\odot}$ . Metaliczności zawarte są między metalicznością galaktyczną a  $1/250 Z_{\odot}$ . Do obliczenia modeli gwiazdowych użyto kodu ewolucyjnego z Bonn. Modele uwzględniają fazy spalania wodoru i helu w jądrze gwiazdy. Interpolację i syntezę populacji przeprowadzono za pomocą nowo opracowanej procedury SynStars. Osiem siatek opisuje normalnie ewoluujące, wolno rotujące gwiazdy masywne; natomiast jedna siatka reprezentuje szybko rotujące gwiazdy, ewoluujące chemicznie jednorodnie. Policzone są masy jąder helowych i węglowo-tlenowych, które jak się powszechnie przyjmuje, odpowiadają masom przyszłych ciał zwartych. Sekwencje policzone w BoOST są bardzo wartościowym wkładem do badań nad strukturą ewolucją masywnych gwiazd. Mogą one służyć i służą, zarówno do budowy szybkich kodów syntezy populacji jak i do identyfikacji obserwowanych gwiazd masywnych a szczególnie bardzo masywnych, gdyż unikalność BoOST polega na opisie gwiazd o masach kilkuset mas Słońca. Interesującym, choć nie nieoczekiwanym, wynikiem HAB1 jest nieobecność bardzo jasnych chłodnych nadolbrzymów, przy wysokiej zawartości metali.

Choć twórcy szczegółowych kodów ewolucji zawsze zachwalają swoje produkty jako zawierające „najnowszą fizykę” ich wyniki nie mogą być traktowane jako opisy rzeczywistych gwiazd i ich populacji, gdyż fizyka gwiazd masywnych jest nadal domeną pełną niepewności. Jest to tematem publikacji HAB2, w której porównano modele gwiazdowe uzyskane przy pomocy pięciu kodów: BPASS (Binary Population and Spectral Synthesis), BoOST (Bonn Optimized Stellar Tracks), Geneva, MIST (MESA Isochrones and Stellar Tracks), i PARSEC (PAdova and TRieste Stellar Evolution Code). Wszystkie te kody są powszechnie używane w syntezach populacji i są stale aktualizowane, gdy pojawiają się nowe wyniki dotyczące, np., reakcji jądrowych lub wiatrów gwiazdowych. Najnowsza fizyka, nie zawsze jest nowa. Tak więc np. nie wszystkie kody używają tego samego kryterium na konwekcję: jedne posługują się kryterium opublikowanym w 1906 przez Karla Schwarzschilda (nie przez jego syna, Martina, jak wydaje się sądzić dr Szésci) inne stosują kryterium Ledoux z 1947 roku, a na ogół konwekcja opisywana jest przez model drogi mieszania (Böhm-Vitense 1958). Co więcej, modele te wykorzystują również różne „pragmatyczne” metody w celu przezwyciężenia trudności numerycznych wynikających z obecności inwersji gęstości w otoczkach gwiazd o masach większych od 40  $M_{\odot}$ . Te, od dawna znane, inwersje gęstości wynikają z połączenia nieefektywnej konwekcji w otoczkach masywnych gwiazd o niskiej gęstości i z jasności lokalnie ponad-Eddingtonowskich. W HAB2 ustalono, że w zależności od użytego kodu,

promieniowanie jonizujące uwalniane przez populacje gwiazd może różnić się o 18%, a maksymalna ekspansja radialna gwiazdy (niezwykle ważna w przypadku ewolucji gwiazd podwójnych) może wynosić od  $100 R_{\odot}$  do  $1600 R_{\odot}$ . Różnice między masami pozostałości gwiazdowych mogą sięgać do  $20 M_{\odot}$ . Autorzy ostrzegają, że „wszelkie próby wyjaśnienia obserwacji, które opierają się na wykorzystaniu modeli gwiazd masywniejszych niż  $40 M_{\odot}$ , powinny być podejmowane z ostrożnością.” Publikacja HAB2, kontynuacja pracy Agrawal et al. 2020 (MNRAS, 497, 4549), w sposób konkretny pokazywała jak niepewne są przewidywania modeli gwiazd masywnych, o czym wydawały się zapominać (albo nie wiedzieć) dziesiątki entuzjastycznych fizyków i astrofizyków szczegółowo obliczających procentowy wkład różnych kanałów ewolucyjnych potencjalnie prowadzących do zlewających się układów podwójnych obserwowanych przez LIGO/Virgo. W pracy, opublikowanej w 2023, której współautorem jest Dr Szécsi (Romagnolo et al. 2023) zbadano ekspansje radialną gwiazd masywnych obliczaną przy pomocy czterech kodów: BoOST i trzech wersji MESA. Z tych kodów wyliczono wzory analityczne, które następnie wprowadzono do kodu syntezy StarTrack. Znowu okazało się, że nie rozumiemy fizyki gwiazd najbardziej masywnych ( $> 50 M_{\odot}$ ).

HAB1 i HAB2 są poświęcone głównie badaniu gwiazd masywnych i bardzo masywnych i nie poświęcają specjalnego miejsca obiektom o małej zawartości metali. Nie są też nastawione na reprezentację szczególnych populacji gwiazd, mogą być używane do badania zarówno supernowych lub/i błysków gamma, jak i gwiazd w gromadach, czy też tytułowych protoplastów źródeł fal grawitacyjnych obserwowanych przez interferometrię LVK (LIGO/Virgo/KAGRA).

Trzy pozostałe publikacje, wchodzące w skład recenzowanej rozprawy habilitacyjnej, poświęcone są masywnym gwiazdom ubogim w metale. Gwiazdy takie są specjalnością dr Szécsi. Dotyczyła ich jej praca doktorska, a jej najczęściej cytowana praca pierwszoautorska (123 cytaty ADS) jest im poświęcona. Dwie z tych publikacji, HAB3 i HAB4, dotyczą roli chłodnych nadolbrzymów w gromadach kulistych, podczas gdy w HAB5 (w tej pracy dr Szécsi jest drugim autorem) obliczone są widma szybko rotujących, jednorodnych chemicznie gwiazd ubogich w metale.

Na początku tego milenium, z pewnym zdumieniem stwierdzono, że w wielu gromadach kulistych obserwuje się więcej niż jedno pokolenie gwiazd. Obserwacje wykazują, że drugie i ewentualnie następne pokolenia różnią się zawartością metali lekkich, a więc powstają z gazu nie zanieczyszczonego jeszcze wybuchami supernowych, lecz zawierającego składniki związane z paleniem wodoru. Nie rozstrzygnięto dotychczas jakiego typu gwiazdy są źródłem tego rodzaju zanieczyszczenia, ani nawet czy gwiazdy są jego źródłem. Brano pod uwagę dotychczas gwiazdy AGB, oddziaływujące ciasne gwiazdy podwójne, gwiazdy masywne oraz gwiazdy bardzo masywne, jak również różne mieszanki takich obiektów. Inne scenariusze przewidują wydmuchiwanie gazu z gromady i następująca po niej akrecję itd. Prace HAB3 i HAB4 proponują jako źródło zanieczyszczenia, masywne gwiazdy ubogie w metale (chłodne nadolbrzymy). W HAB4 główne role

odgrywają dwa typy gwiazd masywnych, które dr Szésci opisała w już w swojej rozprawie doktorskiej: wspomniane już chłodne nadolbrzymy i gorące gwiazdy zwane TWUINami (*Transparent Wind Ultraviolet INtense* – nie wydaje się by nazwa przyjęła się w ogólnie używanej terminologii), które ewoluują chemicznie jednorodnie, i wobec tego, w odróżnieniu od swoich chłodnych kuzynów, nie mają rozległych otoczek. Oba typy gwiazd różnią się prędkością rotacji, której wartość wyznacza ścieżkę ewolucyjną: w tzw. TWUINach jest ona wystarczająco szybka by zapewnić całkowite wymieszanie materii gwiazdowej. Według scenariusza HAB4 drugie pokolenie gwiazd w gromadach kulistych powstaje w otoczkach (powłokach) ubogich w metale chłodnych nadolbrzymów pierwszej generacji, które to otoczki utrzymywane są w miejscu przez ciśnienie promieniowania ultrafioletowego TWUINóh. Po to by taki scenariusz mógł się zrealizować, te dwa typy gwiazd muszą powstawać w odpowiednich proporcjach, tzn. musi im odpowiadać pewien określony rozkład prędkości obrotowych protoplastów. Autorzy używają proporcji 20% gwiazd gorących vs 80% nadolbrzymów bazując na obserwacjach gwiazd masywnych w Małym Obłoku Magellana, ale tam nie obserwuje się gwiazd o masach 150 – 600  $M_{\odot}$ . Poza tym, w ciasnej i zatłoczonej gromadzie kulistej, trudno uwierzyć, że gwiazdotwórcze powłoki pozostają nienaruszone przez oddziaływania z innymi jej obiektami. Autorzy nie wydają się mieć nadmiernego zaufania do swojego modelu, i słusznie zauważają, że ich praca przynajmniej zwraca uwagę na możliwą rolę chłodnych nadolbrzymów w ewolucji gromad.

Publikacja HAB3 przedstawia nieco inne podejście do problemu anomalnego składu chemicznego gwiazd w niektórych gromadach kulistych. Nadal główna rola przypada ubogim w metale, chłodnym nadolbrzymom, ale tym razem ewolucja gwiazdowa połączona jest z hydrodynamicznym opisem zachowania wiatrów gwiazdowych wewnątrz gromady. Okazuje się, że materia z szoków zderzających się wiatrów masywnych gwiazd pierwszej generacji (głównie, ubogich w metale, chłodnych nadolbrzymów) chłodząc się osuwa się do centrum gromady, gdzie, wymieszana z pierwotną materią gromady jest materiałem, z którego tworzą się gwiazdy drugiej generacji. Publikacja HAB3 jest jedną z pionierskich prac, które starają się opisać ewolucję gromad biorąc pod uwagę więcej niż jeden z jej składników. Opis ten jednak zbyt uproszczony by móc porównać jego wyniki z obserwacjami. Nie opisuje on mieszania materii z wiatrów z materią pierwotną oraz nie uwzględnia wyrzucania gwiazd z gromady. Nie pozwala to na zbadanie czy model oddaje obserwowaną antykorelację między procentową zawartością gwiazd pierwszej generacji a masą gromady. Nadolbrzymy zapadają się w końcu w czarne dziury (autorzy używają określenia „wpadają do czarnej dziury” – po angielsku „fall into” – co jest niezbyt szczęśliwym opisem), w czym dr Szésci i współpracownicy widzą związek ich scenariusza z emisją fal grawitacyjnych. Oczywiście powstanie czarnej dziury w gromadzie jest tylko pierwszym krokiem na drodze do zlania się jej z inną czarną dziurą. Muszą się najpierw spotkać, wytrwać w parze, choć niekoniecznie w gromadzie itd., ale to zupełnie inna historia, do której HAB3 i HAB4 nie wnoszą istotnego wkładu. Z uznaniem należy

wobec tego przyjąć plany dr Szésci, opisane w konkluzji podsumowania osiągnięć zawodowych, zgodnie z którymi zamierza wykorzystać swoje dotychczasowe osiągnięcia do próby opisu potencjalnych przodków źródeł fal grawitacyjnych obserwowanych przez obserwatoria LVK.

Publikacja HAB5 wiąże się bezpośrednio z jednym z tematów pracy doktorskiej dr. Szésci: szybko rotującymi, chemicznie jednorodnymi, masywnymi gorącymi gwiazdami, zwanymi TWUINami. W pracy policzono syntetyczne widma takich gwiazd (o masach od 20 do 130  $M_{\odot}$ ) w różnych fazach ewolucyjnych, od zerowego ciągu głównego do fazy palenia helu w jądrze. Okazuje się, że TWUINY w pewnej fazie wyglądałyby tak jak bardzo gorące gwiazdy typu O, a w fazie palenia helu, jak gwiazdy typu WO. W oryginalnej pracy wspomina się, że TWUINY typu O, mogłyby być protoplastami długich błysków gamma albo supernowych typu Ic, podczas gdy w podsumowaniu mowa jest o przodkach źródeł fal grawitacyjnym, powołując się na jeden w możliwych kanałów ewolucyjnych dla takich źródeł.

Prace naukowe wchodzące w skład rozprawy habilitacyjnej dr Szésci wnoszą znaczny wkład do rozwoju badań na strukturą i ewolucją gwiazd masywnych i bardzo masywnych, ważnej dziedziny astrofizyki, której znaczenie wzrosło wskutek detekcji fal grawitacyjnych ze zlewających się czarnych dziur. Trzy z tych prac dotyczą masywnych i bardzo masywnych gwiazd ubogich w metale, temat, w którym dr Szésci jest uznanym specjalistą. Szczególnie ważne, jest w dwóch z tych prac, wskazanie ważnej roli, którą chłodne nadolbrzymy i możliwie gorące, szybko rotujące, jednorodnie chemiczne gwiazdy mogą odgrywać w ewolucji gromad kulistych. Dwie następne (w czasie) prace wnoszą istotny wkład w badania nad strukturą gwiazd masywnych i bardzo masywnych w kontekście ewolucyjnym i populacyjnym.

Przed zakończeniem mojej recenzji, chcę się podzielić dwiema krytycznymi uwagami. Pierwsza dotyczy stylu omówienia osiągnięć. Autorka przesadza w nim nieco, z przypisywaniem sobie zasług, które do niej nie należą. Jest to zapewne skutkiem próby dostosowania treści rozprawy do nieodpowiednio do niej dobranego tytułu, o czym już wspomniałem na wstępie. I tak, np., Dr Szésci rozpoczyna omówienie swoich osiągnięć od opisu związku między źródłami fal grawitacyjnych a masywnymi gwiazdami ubogimi w metale i cytując wyłącznie swoje prace sugeruje, że odkrycie tego związku jej zasługą. W dalszym ciągu opisu ciągle powoływanie się na źródła fal grawitacyjnych jest dość irytujące, tym bardziej, że rozprawa nie dotyczy w ogóle gwiazd podwójnych, a słowo „spin” (czarnej dziury), określające ważny parametr uzyskany dzięki obserwacjom LVK, jest w rozprawie nieobecne. Choć mogłoby być, bo autorka zajmuje się, w sposób niebanalny zresztą, rotacją potencjalnych protoplastów czarnych dziur obserwowanych przez LVK.

Druga moja uwaga krytyczna dotyczy sprawy formalno-etycznej. Jak już wspomniałem na początku tej recenzji, dr Szésci twierdzi, że „dzieli” pierwsze autorstwo dwóch prac wchodzących w skład rozprawy. Nigdy, w mojej bardzo długiej i międzynarodowej działalności oceniającej badania

naukowej, nie spotkałem się z takim określeniem, ale przynajmniej w przypadku HAB5, sprawa jest jasna: praca jest o widmach gwiazd, pierwsza autorka jest od nich specjalistką więc je policzyła, ale specjalistką od gwiazd, o które chodzi jest dr Szésci, więc role i wkład dwóch pierwszych autorek są w tym przypadku jasne. Nie jest tak gdy chodzi o HAB2. W tym przypadku, pierwsza autorka, Poojan Agrawal, była doktorantką dr Szésci. We wstępie do swojej pracy doktorskiej, P. Agrawal stwierdza oficjalnie, że jest autorką 70% całości HAB2. Jeśli współautorzy również złożyli oświadczenia o swoim wkładzie do pracy, wkład dr Szésci nie mógł wynosić 30% bo autorów jest czwórka. W procedurze nadawania stopnia doktora habilitowanego, w której biorę udział, nie bierze się jeszcze pod uwagę udziału procentowego autorów w danej pracy, bazując się tylko na opisie udziału w danej pracy, więc formalnie, zapewne, wszystko jest w porządku. Niemniej jednak stwierdzam, że opisując swoją rolę w HAB2, dr Szésci pisze: „Oryginalny pomysł był mój”, ale wspomniana już wyżej praca Agrawal et al. 2020 jest już poświęcona realizacji dokładnie tego samego pomysłu, tyle, że z innymi kodami. Wyniki też są podobne: w obu pracach znajdujemy np. konkluzję „the predictions of remnant masses can vary by up to  $20 M_{\odot}$ ”. W pracy z 2020 r., która jest Rozdziałem 4 pracy doktorskiej P. Agrawal (praca HAB2 jest rozdziałem 2), dr Szésci jest czwartym autorem. Tak czy inaczej, fakt, że w celu uzyskania stopnia doktora habilitowanego, dr Szésci musiała sięgnąć po pracę, która jest jedną z czterech prac na podstawie, której przyznano tytuł doktora (PhD) jej studentce, na pewno świadczy o pewnej słabości jej dorobku naukowego wyprodukowanego po uzyskaniu tego tytułu przez nią samą.

Ponieważ moją rolą jest ocena dorobku naukowego przedstawionego w rozprawie habilitacyjnej a nie ustalanie jego autorstwa, uważam że, biorąc pod uwagę jego całość (włącznie z HAB2), osiągnięcia naukowe dr Szésci odpowiadają wymaganiom określonym w § 4 ust. 1 pkt 2, tzn. posiada ona w dorobku osiągnięcia naukowe, stanowiące znaczny wkład w rozwój astrofizyki gwiazd masywnych. Dotyczy to też dorobku z wyłączeniem z niego publikacji HAB2.

Jean-Pierre Lasota-Hirszowicz

Profesor w Centrum Astronomicznym im. Mikołaja Kopernika Polskiej Akademii Nauk