

Olsztyn, 19 grudnia 2023

dr hab. Marcin Hajduk, prof. UWM  
Wydział Geoinżynierii  
Instytut Geodezji i Budownictwa  
Katedra Geodezji  
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie  
ul. Oczapowskiego 2, 10-719 Olsztyn

**Recenzja osiągnięcia naukowego dr. Ambry Nanni pt.**

*Badanie gromadzenia się pyłu w galaktykach*

Pani dr Ambra Nanni obroniła swoją pracę magisterską pt. „Circularization bias in X-ray estimates of total and gas mass and gas metallicity for galaxy clusters” we wrześniu 2009 na Uniwersytecie Bolońskim pod opieką prof. Luca Ciottiego. Pracę doktorską pt. „Dust production in thermally pulsing asymptotic giant branch stars”, przygotowaną pod opieką prof. Alessandra Bressana, obroniła z wyróżnieniem w International School for Advanced Studies (SISSA). Następnie Pani dr Ambra Nanni odbywała staże podoktorskie w Uniwersytecie Keele (pół roku), Uniwersytecie w Padwie (4 lata) oraz Laboratoire d'Astrophysique de Marseille (LAM) (2 lata). Od 2021 roku zatrudniona jest w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Warszawie.

Na osiągnięcie naukowe Pani dr. Ambry Nanni pt. „Badanie gromadzenia się pyłu w galaktykach” składa się osiem prac. W niniejszej recenzji będę posługiwał się oznaczeniami od [H1] do [H8] dla poszczególnych prac odpowiadającym oznaczeniom stosowanym przez Autorkę w opisie osiągnięcia naukowego. W pięciu pracach Pani dr Ambra Nanni jest pierwszą autorką ([H1], [H3], [H4], [H5], [H6]) a w pozostałych trzech ([H2], [H7], [H8]) drugą.

Jednym z celów badawczych postawionych w osiągnięciu naukowym jest zrozumienie powstawania pyłu formującego się w galaktykach we wczesnym Wszechświecie. Poświęcone

są temu prace [H1] i [H2]. Do modelowania chemicznej ewolucji galaktyk wykorzystany został publicznie dostępny kod OMEGA. Do badania ewolucji pyłu zostały wykorzystane programy napisane przez samą Autorkę. Dopasowanie do rozkładu energii w widmie (SED: Spectral Energy Distribution) odbywa się za pomocą kodu CIGALE. Z modelowania SED Autorka otrzymała masę gwiazd, pyłu oraz tempo powstawania gwiazd.

W pracach [H1] i [H2] Autorka bada ewolucję pyłu i gazu w galaktykach na dużych przesunięciach ku czerwieni (Lyman Break Galaxies: LBG) oraz w lokalnych galaktykach karłowatych o niskiej metaliczności. Modelowanie obejmuje produkcję pyłu w wybuchach supernowych II typu oraz w gwiazdach Asymptotycznej Gałęzi Olbrzymów (AGB), niszczenie ziaren pyłu w wyniku szoków powstających w wybuchach supernowych oraz wzrost ziaren pyłu w ośrodku międzygwiazdowym. Początkowa funkcja masy (Initial Mass Function: IMF) jest sparametryzowana, występuje w dwóch formach. Modele najlepiej odtwarzają obserwacje dla jednej z wybranych IMF, która faworyzuje powstawanie masywnych gwiazd i tym samym większą ilość wybuchów SN typu II. Aby odtworzyć obserwacje, Autorka musiała przyjąć, że przynajmniej 50% metali wyrzuconych w wyniku wybuchu SN typu II kondensuje się w pył.

Modelowanie rozkładów energii w widmie dla badanej próbki obiektów wskazuje na to, że na początku cyklu barionowego w galaktykach następuje okres wzrostu ilości pyłu w stosunku do całkowitej masy gwiazd ( $sM_{dust}$ ). Wzrost ten zasilany jest produkcją pyłu na skutek wybuchów SN typu II. Następnie wartość  $sM_{dust}$  maleje z powodu efektu wpływów galaktycznych (maksimum  $sM_{dust}$  jest obserwowane dla około 100 milionów lat od rozpoczęcia cyklu barionowego w galaktykach karłowatych oraz na dużych  $z$ ). Usuwanie pyłu przez galaktyczne wypływy jest bardziej efektywne niż niszczenie pyłu przez wybuchy SN typu II. Wzrost pyłu w ośrodku międzygwiazdowym nie musi być brany pod uwagę, aby wyjaśnić ewolucję wartości  $sM_{dust}$ .

Znana metaliczność galaktyk karłowatych z obserwacji spektralnych pozwoliła Autorce na oszacowanie, że początkowa masa gazu powinna wynosić od 10 do 100 razy więcej od końcowej masy gwiazd. Taka wartość pozwala na odtworzenie ewolucji metaliczności w galaktykach karłowatych. Tą wartość Autorka wykorzystwała później przy badaniu galaktyk

na wysokich  $z$ .

Praca [H2] wyjaśnia brak obserwacji niektórych galaktyk dla  $z$  mieszczącym się w zakresie między 5 a 10 przez interferometr ALMA. Pył jest stosunkowo szybko gromadzony dzięki wybuchom supernowych typu II. Następnie wypływy gazu i pyłu z galaktyk zmniejszają ilość pyłu tak, że przestają one być widoczne w podczerwieni.

W kolejnych pracach [H3]-[H7] Autorka modeluje rozkład energii w widmie dużych populacji gwiazd na asymptotycznej gałęzi olbrzymów, wykorzystując dostępne obserwacje.

Praca [H3] wykorzystuje dopasowanie obserwowanych rozkładów energii gwiazd AGB w Małym Obłoku Magellana do modeli stworzonych przez Autorkę. Modele zostały sporządzone dla zakresów parametrów spodziewanych dla gwiazd AGB i dla odpowiedniej metaliczności. Wyniki modeli znacznie się różniły między sobą w zależności od przyjętych własności pyłu. Autorka otrzymała większe prędkości otoczek i większą utratę masy w stosunku do wyników z literatury. W szczególności, otrzymała stosunek masy gazu do pyłu dużo wyższy niż wartość często przyjmowana w literaturze (200). Stosunek ten zmieniał się istotnie w zależności od ilości pyłu zawartej w otoczce gwiazdy.

Praca [H4] prezentuje podobne rezultaty na podstawie kodów rozwiniętych w pracy [H3] dla Obłoków Magellana. Praca [H4] potwierdza duży rozrzut wartości stosunków gazu do pyłu. Autorka znajduje w próbce nieliczne obiekty o stosunkowo małych wartościach stosunku masy gazu do pyłu (100-200). Naturalnym testem dla modeli są obserwacje czterech źródeł przed interferometr ALMA, dla których znane są prędkości wiatru gwiazdowego i tempo utraty masy jest znane z obserwacji linii molekularnych. Duża zgodność modelowania z [H4] z wynikami otrzymanymi dla tych czterech obiektów weryfikuje pozytywnie dokładność modeli stworzonych przez Autorkę.

Praca [H5] dopasowuje obserwowane pozycje gwiazd węglowych w LMC i SMC na diagramach kolor-kolor w podczerwieni wykorzystując różne modele ziaren pyłu. Mniejsze ziarna pyłu lepiej odtwarzają obserwacje podczerwonych diagramów kolor-kolor niż większe ziarna. Spośród około 50 kombinacji wielkości ziaren i danych optycznych, 7 modeli dobrze odwzorowuje obserwacje.

W pracy [H6] Autorka wykorzystuje metodę Lebzelter i in. (2018, A&A, 616L, 13)

opartą na obserwacjach Gaia DR2 do nałożenia dalszego ograniczenia na modele pyłu węglowego. Autorka posługuje się diagramami jasność-funkcja Wesenheita z obserwacji Gaia i 2MASS. Z modeli ewolucyjnych Autorka otrzymała syntetyczną fotometrię w pasmach 2MASS i Gaia. Z dostępnych modeli pyłu, tylko dwa dobrze pasują do obserwowanych diagramów. Tylko te dwa modele zostały wykorzystane do modelowania w pracy [H4].

Publikacja [H7] przedstawia diagramy jasność-okres dla gwiazd w Obłokach Magellana. Okresy zostały wyznaczone na podstawie obserwacji z przeglądu VISTA. Modelowanie pozwoliło na wyznaczenie tempa utraty masy z badanej próbki gwiazd. Część z badanych obiektów była już modelowana w pracach [H3] i [H4].

Ostatnia praca cyklu, [H8], bada pochodzenie ziaren pyłu SiC w Układzie Słonecznym. Ziarna pyłu oznaczone jako Y oraz Z pochodzą z gwiazd AGB, jednak badanie mas i metaliczności tych gwiazd nie dają zgodnych rezultatów. W pracy zostały wykorzystane kody Autorki do modelowania wzrostu ziaren pyłu. Szczegółowa analiza wielkości ziaren wskazuje na to, że pochodzą one z populacji gwiazd AGB o masie około  $2 M_{\odot}$  oraz metaliczności równej około  $1 Z_{\odot}$ .

Reasumując, rozwijane przez dr Ambrę Nanni modele pozwoliły na osiągnięcie szeregu interesujących i ważnych rezultatów. Prace bazują na doświadczeniu i wynikach otrzymanych przy pracy doktorskiej, jednak wychodzą daleko poza nią. Autorka umiejętnie łączy doskonałą znajomość teorii budowy i ewolucji gwiazd z obserwacjami. Pył w kosmosie jest niemal wszechobecny, zatem badania prowadzone przez Autorkę mają uniwersalne znaczenie, co Autorka znakomicie wykorzystuje. Imponujący jest zakres zastosowań modeli Autorki - od Układu Słonecznego, poprzez Lokalną Grupę Galaktyk, aż do galaktyk na wysokich redshiftach. W tak szerokim zakresie zagadnień metodologia Autorki udowadnia swą przydatność.

Za trzon osiągnięcia naukowego uznają prace [H3], [H4], [H5] oraz [H6]. Dotyczą one utraty masy przez gwiazdy w końcowych fazach ewolucji. Jest to jeden z najbardziej złożonych aspektów ewolucji gwiazd. Tą tematyką Autorka zajmuje się od doktoratu. Grupa, z której się wywodzi, opublikowała m.in. zestaw modeli ewolucyjnych PARSEC. Do tej grupy badawczej należy prof. Paola Marigo, laureatka grantu ERC.

Badania przedstawione w rozprawie habilitacyjnej są znaczącym rozszerzeniem prac prowadzonych przed obroną doktoratu, które dotyczyły produkcji pyłu w pulsujących termicznie gwiazdach Asymptotycznej Gałęzi Olbrzymów. Doskonałą znajomość zagadnień dotyczących powstawania pyłu w tych obiektów Autorka wykorzystuje do syntezy populacji dla galaktyk na wysokich redshiftach oraz lokalnych w pracach [H1] oraz [H2]. Podejmują one temat powstawania pyłu w pierwszych formujących się galaktykach we Wszechświecie.

W przedstawionej dokumentacji występują pewne błędy edytorskie. Do najpoważniejszych należy powtórzenie sekcji „Contributed talks” w autoreferacie. Występują również liczne niezręczne lub błędne wyrażenia, prawdopodobnie wynikające z korzystania z jednej z witryn do tłumaczenia języka (np. „Od  $\sim 2016$  regularnie sędziuję dla ApJ, MNRAS i A&A”).

Kolejność prac w przedstawionym cyklu nie jest moim zdaniem najlepiej dobrana. W osiągnięciu naukowym można wyróżnić bloki tematyczne ([H1] i [H2] - modelowanie galaktyk, [H3], [H4], [H5], [H6], [H7] - modelowanie gwiazd w Obłokach Magellana i ostatnia praca, [H8] - poświęcona ziarnom pyłu SiC w Układzie Słonecznym). W mojej ocenie prace [H5] i [H6] powinny występować przed pracami [H3] i [H4]. Prace [H3] i [H4] korzystają z wyników otrzymanych w [H5] i [H6].

Najważniejsza uwaga co do merytorycznej treści osiągnięcia to brak uwzględnienia ewolucji w układach podwójnych. Autorka posługuje się kodami do modelowania gwiazd pojedynczych i przy całej złożoności tego procesu dla gwiazdy pojedynczej trudno wyobrazić sobie uwzględnienie obecności towarzysza, co skutkowałoby radykalnym zwiększeniem liczby parametrów. Mimo to, brakuje mi chociażby wspomnienia układów podwójnych, zarówno w pracach poświęconych modelowaniu galaktyk, jak również w pracach poświęconych modelowaniu gwiazd. Oprócz gwiazd AGB oraz SN typu II, formacja pyłu w galaktykach może następować również w obiektach przechodzących przez ewolucję w układzie podwójnym. Przykładem mogą być kolizje wiatrów gwiazdowych w układach zawierających składnik typu WC (Lau i in., 2023, ApJ, 951, 89).

Decin i in. (2020, Science, 369, 1497) zaobserwowali za pomocą interferometru ALMA morfologie galaktycznych gwiazd AGB. W żadnym z obserwowanych przypadków nie była

ona sferycznie symetryczna. We wszystkich wypadkach obrazy pokazują spiralne struktury, co sugeruje, że zachodzi tam interakcja z towarzyszem. Morfologia jest skorelowana z tempem utraty masy.

Nie należy również zapominać o mergerach, np. (prawdopodobnie) gwiazdach typu R CrB, które są wydajnymi fabrykami pyłu węglowego. Być może wiele z obiektów, dla których nie udało się znaleźć satysfakcjonującego dopasowania SED jest układami podwójnymi.

Dorobek Pani dr. Ambry Nanni oceniam bardzo wysoko jak na ten etap kariery naukowej. Autorka jest współautorką łącznie w ponad 30 recenzjonowanych publikacjach, w tym w ośmiu jest pierwszą autorką. Lista ta wydłuża się w bardzo szybkim tempie ze względu na zaangażowanie Autorki w różne projekty. Liczba cytowań prac jest wysoka. Prace przedstawione w cyklu są wysoko cytowane (w większości wypadków liczba cytowań przekroczyła 30, mimo że prace zostały stosunkowo niedawno opublikowane).

Oprócz aktywności publikacyjnej, na wyróżnienie zasługuje aktywność konferencyjna. Autorka przedstawiła zaproszone referaty na 9 spotkaniach (przede wszystkim workshopy). W trzech konferencjach brała udział w pracach komitetu naukowego. Autorka była i jest głównym wykonawcą trzech projektów finansowanych i liderem jednego z WP w granicie ERC. Prowadziła dwukrotnie kurs „Fizyka i chemia ISM”. Pod opieką ma w tej chwili jednego doktoranta i postdoca. Współprowadziła dwóch doktorantów i opiekowała się kilkoma studentami. Na wyróżnienie zasługuje bogata działalność popularyzatorska.

Reasumując, Autorka przedstawiła cykl ośmiu powiązanych tematycznie artykułów naukowych, które zostały już opublikowane. W pięciu z nich była wiodącą autorką. Jej wiodący wkład nie pozostawia wątpliwości ze względu na oświadczenia autorów. Autorka jest specjalistką w dziedzinie modelowania ewolucji gwiazdowej i pyłu. Z deklaracji współautorów jasno wynika, że wkład Pani dr. hab. Ambry Nanni w trzy pozostałe publikacje, w której była drugim autorem, nie był wiodący, jednak bez jej wkładu, opartego na specjalistycznej wiedzy i rozwiniętym oprogramowaniu, trudno sobie wyobrazić powstanie prac [H2] i [H8].

Po zapoznaniu się z dorobkiem naukowym Pani dr. Ambry Nanni w załączonej doku-

mentacji oraz z wynikami przedstawionymi w rozprawie habilitacyjnej uważam, że spełniają one zwyczajowe i ustawowe kryteria stawiane kandydatom do stopnia doktora habilitowanego. W mojej ocenie osiągnięcia naukowe dr. Ambry Nanni, ubiegającej się o stopień doktora habilitowanego, odpowiadają wymaganiom określonym w art. 219 ust. 1 pkt 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2023 r. poz. 742 z późn. zm.) i popieram wniosek o nadanie stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk przyrodniczych w dyscyplinie astronomia. Krytyczne uwagi, które wyraziłem w recenzji nie obniżają wartości wyników Pani dr hab. Ambry Nanni. Wskazane osiągnięcia naukowe Pani dr. Ambry Nanni, ubiegającej się o nadanie stopnia doktora, habilitowanego stanowią znaczący wkład w rozwój dyscypliny.

Maciej Hajduk