

Dr hab. Andrzej Marecki

Recenzja rozprawy habilitacyjnej
pani **dr Doroty Koziel-Wierzbowskiej**

Badanie własności AGN-ów aktywnych radiowo z uwzględnieniem ich morfologii

1. Wstęp

Na osiągnięcie naukowe kandydatki składa się pięć artykułów opublikowanych w latach 2011-2021 w najlepszych czasopismach w dziedzinie astrofizyki: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* (H1, H2), *Astrophysical Journal* (H3, H5) i *Astrophysical Journal Supplement Series* (H4). We wszystkich tych wieloautorskich publikacjach kandydatka jest pierwszą autorką i zgodnie z oświadczeniami współautorów miała dominujący wkład w ich tworzenie. Według bazy ADS na dzień 14.03.2024 artykuły te mają łącznie 89 cytowań (H-index=4). W pracach tych analizowano wieloczęstotliwościowe dane aktywnych radiowo AGN-ów (RLAGN). Praca H2 traktuje o jednej radiogalaktyce – CGCG 292–057, natomiast pozostałe cztery bazują na obszernych próbkach RLAGN-ów.

2. Charakterystyka składowych osiągnięcia naukowego

W pracy **H1** autorki wyselekcjonowały z przeglądów Cambridge (3C-9C) i dwóch katalogów radioźródeł gigantycznych próbkę 401 radiogalaktyk typu FR II mających swoje identyfikacje optyczne w przeglądzie SDSS, skąd pobrano ich parametry fotometryczne i spektroskopowe. Morfologia FR II została ustalona w oparciu o przeglądy NVSS i FIRST. Ponadto dla obiektów z tej próbki pobrano ich dane z bazy *STARLIGHT*. Bazując na tym materiale autorki przestudiowały zależności pomiędzy własnościami optycznymi a radiowymi obiektów. Konkluzje są m.in. następujące. 1° Jasności w linii H α i OIII są wyraźnie skorelowane z jasnością radiową na częstotliwości 1,4 GHz (Fig. 2 i Fig. 3) przez 3 rzędy wielkości w $P_{1.4\text{GHz}}$. 2° Korelacja pomiędzy tymi wielkościami pozostaje równie silna, gdy zostaną one unormowane do masy centralnej czarnej dziury (Fig. 6). Radiogalaktyki z gorącymi plamami odznaczają się największymi wartościami $P_{1.4\text{GHz}}/M_{\text{BH}}$. 3° Bardzo wyraźna zależność zachodzi także pomiędzy masą czarnej dziury (BH) a masą gwiazd: $M_{\text{BH}} \sim M_{\star}^{1.13}$ (Fig. 22). 4° Trzy spośród badanych galaktyk mają podwójne profile linii widmowych, co może sugerować obecność podwójnych centralnych czarnych dziur w tych obiektach. 5° Galaktyki z radiowymi strukturami FR II są eliptyczne. W ostatnim zdaniu podsumowania artykułu autorki stwierdzają, że w radiogalaktykach FR II aktywność w dziedzinie optycznej i radiowej są silnie powiązane ze sobą, z tym że cechy ich aktywności optycznej różnią się od tych w AGN-ach radiowo nieaktywnych (RQAGN).

Artykuł **H2** jest poświęcony obiektowi CGCG 292–057, radiogalaktyce posiadającej cechy na tyle unikalne, że niewątpliwie zasługuje ona na takie monograficzne opracowanie. W dziedzinie optycznej radiogalaktyka ta przejawia podwójne profile linii widmowych, co sygnalizuje możliwość obecności w jej centrum dwóch supermasywnych czarnych dziur. Taki układ może powstać wskutek mergera. Aby sprawdzić, czy faktycznie CGCG 292–057

ma cechy mergera, autorzy wykonali obserwacje 2-metrowym teleskopem Faulknes North na Hawajach i 60-cm teleskopem na Suhorze. Uzyskane obrazy przedstawione są na Fig. 1 i wspierają hipotezę, że obiekt ten jest mergerem lub postmergerem, a nie niezaburzoną galaktyką spiralną. Struktura radiowa CGCG 292–057 jest bardzo nietypowa. Jest to mianowicie tzw. obiekt o kształcie X, co unaocznia mapa z przeglądu NVSS (Fig. 3, lewy panel, kontury czarne), a jednocześnie obiekt podwójnie podwójny, tj. taki, gdzie oprócz pary radiopłatów zewnętrznych obserwuje się parę radiopłatów wewnętrznych (Fig. 3, lewy panel, kontury białe). Aby lepiej zobrazować tę wewnętrzną strukturę, autorzy wykonali obserwacje radiowe interferometrem GMRT na częstotliwości 606 MHz (Fig. 3, prawy panel). Panuje zgoda co do tego, że struktury podwójnie podwójne powstają wskutek przerwania a następnie wznowienia aktywności, natomiast występowanie struktur „X” jest nie do końca wyjaśnione. W literaturze można bowiem spotkać aż pięć teorii opisujących przyczyny powstawania takich struktur i żadna nie pasuje do wszystkich obiektów posiadających je. Jedna z nich zakłada raptowną reorientację osi BH w następstwie mergera, a w ślad za tym reorientację dysku akrecyjnego i dżetów. Dzięki własnym obserwacjom autorzy pracy H2 byli w stanie pokazać, że właśnie ta teoria dobrze opisuje CGCG 292–057, a w sekcji *Concluding remarks* przedstawiają oni kompletny scenariusz ewolucji tej radiogalaktyki wyjaśniający zarówno strukturę „X” jak i strukturę podwójnie podwójną.

Celem badań opisanych w artykule H3 było sprawdzenie, czy wydajność wytwarzania dżetów w RLAGN-ach zależy od cech ich galaktyk macierzystych, czy raczej jest zdeterminowana przez wewnętrzne własności przepływów akrecyjnych. Swoje badania autorzy przeprowadzili na galaktykach typu „2”, tj. zorientowanych tak, iż linia widzenia tworzy mały kąt z płaszczyzną dysku galaktycznego, a co za tym idzie, gdzie źródła potężowego kontinuum oraz linii H β i Fe II są zasłonięte przez torus gazowo-pyłowy. Ponadto ograniczono się do obiektów, gdzie współczynnik Eddingtona $\lambda > 0.003$. Ze względu na to, że odsetek RLAGN-ów zależy od masy BH oraz λ , porównanie własności galaktyk macierzystych RLAGN-ów i RQAGN-ów wymaga stosowania porównań w parach galaktyk o tej samej M_{BH} i λ , a także poczerwienieniach. Uzyskanie rezultaty wskazują na to, iż wydajność wytwarzania dżetów nie jest w całości zdeterminowana przez M_{BH} i λ , ale także przez spin BH i/lub przez natężenie pola magnetycznego w AGN-ie. Ponadto RLAGN-y mają wyższy wskaźnik skupienia (*concentration index* – CI) oraz wcześniejsze typy morfologiczne (głównie eliptyczne) niż RQAGN-y (głównie soczewkowate). Co więcej, im wyższa radiowa głośność RLAGN-u, tym wcześniejszy jest typ morfologiczny galaktyki macierzystej.

W artykule H4 autorki prezentują katalog 32 616 radioźródeł identyfikowanych w dziedzinie optycznej z galaktykami, a w dziedzinie radiowej mającymi albo struktury nierozdzielone albo rozciągle (*Radio sources associated with Optical Galaxies and having Unresolved or Extended morphologies*, ROGUE). Powstał on ze złożenia przeglądów SDSS i FIRST/NVSS. Na podkreślenie zasługuje fakt, że identyfikacja została przeprowadzona manualnie. Pokłosem tych poszukiwań jest m.in. odkrycie nieznanych dotąd 55 radioźródeł gigantycznych, 16 radioźródeł podwójnie podwójnych, 9 radioźródeł w kształcie „X” i 25 radioźródeł w kształcie „Z”. Jest to znaczące osiągnięcie, biorąc pod uwagę fakt, iż identyfikowanie obiektów w oparciu o przeglądy SDSS, FIRST i NVSS, było wielokrotnie wykonywane wcześniej w sposób zautomatyzowany. Zgodnie z tym, co dotychczas było wiadomo z literatury (w tej liczbie z pracy H3), większość tych radiogalaktyk to galaktyki eliptyczne (62%). Ponadto stwierdzono, że linia podziału na klasy FR I/FR II jest rozmyta. Jest to ciekawy wynik, jako że tradycyjnie uznaje się, iż obiekty FR II są jaśniejsze radiowo.

Tymczasem w przeglądach o niskim poziomie detekcji radiowej, jakim jest ROGUE, populacja źródeł FR II o małych jasnościach jest znacząca i *de facto* „wymieszana” z populacją źródeł FR I, co doskonale widać na diagramie Ledlowa-Owena (Fig. 6).

W oparciu o katalog ROGUE powstał artykuł H5. Problem astrofizyczny, jaki autorzy w nim rozwiązyali, polega na wskazaniu źródła emisji radiowej, która, jak wiadomo, może pochodzić albo z AGN-u, albo z gwiazdotwórczości. Gdy galaktyka posiada wielkoskalową strukturę radiową, to jest ona zasilana AGN-em. Tymczasem aż 90% obiektów w katalogu ROGUE nie ma wielkoskalowych struktur radiowych, a zatem wskazanie w nich przyczyny emisji radiowej jest nietrywialne. Autorzy pracy H5 zaproponowali dwie niezależne metody, a wybór zastosowania każdej z nich zależy od dostępnych danych. Metoda pierwsza to diagram MIRAD, na którym uwidacznia się zależność gęstości strumienia w paśmie W3 średniej podczerwieni a strumieniem radiowym na 1,4 GHz. Druga metoda to diagram DLM, w którym na osi poziomej odkłada się jasność radiową unormowaną do masy gwiazd, a na osi pionowej wielkość $D_n(4000)$. Ta druga wielkość, będąca wskaźnikiem gwiazdotwórczości, to wysokość skoku w widmie optycznym na fali 4000Å, który to skok jest wywoływany przez linie absorpcyjne wapnia. Dla wszystkich galaktyk z katalogu ROGUE $D_n(4000)$ i M_* są dostępne w bazie *STARLIGHT*. Zaletą metody DLM jest to, że nie wymaga ona dostępności danych w podczerwieni, natomiast metoda MIRAD nie wymaga dostępności widm. Obie metody poprawnie klasyfikują 99,5% RLAGN-ów i 98%-99% galaktyk gwiazdotwórczych.

3. Podsumowanie i wniosek

Artykuły przedłożone przez kandydatkę jako jej osiągnięcie naukowe do nadania stopnia doktora habilitowanego zostały przyjęte do publikacji w najlepszych czasopismach naukowych w dziedzinie astrofizyki stawiających manuskryptom wysrubowane wymagania i poddających je rygorystycznemu recenzowaniu. Już to świadczy o tym, iż prace te prezentują wysoki poziom merytoryczny. Kandydatka była pomysłodawczynią wszystkich pięciu prac i główną wykonawczynią. Tematyka tych publikacji wytycza kierunki przyszłych badań kandydatki i jej zespołu. Kieruje ona projektem ROGUE opisanym w H4.

Poza tym kandydatka ma na swoim koncie znaczącą liczbę innych osiągnięć naukowych, wykazanych w punkcie 5. autoreferatu, które zaowocowały wieloma publikacjami. Według bazy ADS od roku obrony doktoratu (2008) była ona współautorką 40 recenzowanych artykułów, które na dzień 14.03.2024 miały 879 cytowań (H-index=17). Kandydatka ma również znaczący dorobek dydaktyczny i popularyzatorski (punkt 6. autoreferatu).

W cyklu artykułów H1-H5 kandydatka wykazała się bardzo dobrym warsztatem naukowym. Zaprezentowana rozprawa z nawiązką wypełnia kryteria osiągnięcia naukowego do nadania stopnia doktora habilitowanego, a kandydatka jest dojrzałą, samodzielną i aktywną naukowczynią, wybitną specjalistką w dziedzinie astrofizyki radiogalaktyk. Wnoszę zatem o **dopuszczenie jej do dalszych etapów postępowania habilitacyjnego.**

Andrzej Morecki¹