

dr hab. Wojciech Lewandowski
Instytut Astronomii im. prof. Janusza Gila,
Wydział Fizyki i Astronomii,
Uniwersytet Zielonogórski

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Urszuli Pajdosz-Śmierciak:

Niskoenergetyczna, dyfuzyjna emisja blazarów a model unifikacyjny aktywnych galaktyk

Badania aktywnych jąder galaktyk są jedną z głównych dziedzin radioastronomii niemalże od samego jej zarania, co nie powinno dziwić, wszak radioźródła pozagalaktyczne stanowią znaczną część obiektów które jesteśmy zdolni obserwować za pomocą radioteleskopów. Większość z nich stanowią tzw. galaktyki aktywne, które są wdzięcznym obiektem obserwacji radiowych, zarówno w szerokim spektrum częstotliwości obserwacyjnych, jak i szerokim zakresie rozdzielczości i skal kątowych. To właśnie dzięki takim obserwacjom narodził się *unifikacyjny model aktywnych galaktyk*, dzięki któremu zrozumieliśmy że wszystkie obserwowane wcześniej kategorie obiektów o znacząco różnych własnościach obserwacyjnych daje się powiązać zakładając, iż źródłem energii tych obiektów zawsze są supermasywne czarne dziury znajdujące się w centrach galaktyk. Obserwowana różnorodność cech obserwacyjnych wynika z różnic dotyczących “warunków pracy” tych centralnych silników (tempo akrecji, struktura otoczenia, ewolucja) a także w dużej mierze z geometrii układu, w szczególności ułożenia osi symetrii (często tożsamej z osią rotacji czarnej dziury) względem kierunku do obserwatora.

Wspomniany unifikacyjny model aktywnych galaktyk pomógł nam zrozumieć fizykę akreujących czarnych dziur i tego jaki mają one wpływ na otoczenie. Pozwolił nam na szybką i skuteczną klasyfikację różnych typów obiektów i jest bezcenną pomocą w interpretacji obserwacji. W tym kontekście przedstawiona mi do recenzji praca mgr. Urszuli Pajdosz-Śmierciak zatytułowana “*Niskoenergetyczna, dyfuzyjna emisja blazarów a model unifikacyjny aktywnych galaktyk*” stanowi naturalny kolejny krok w badaniach nad tego typu obiektami. Autorka zajęła się bowiem klasą radioźródeł które wydają się łączyć cechy galaktyk aktywnych należących do znacząco różnych kategorii klasyfikacyjnych. Fakt, że takie obiekty istnieją, oraz że stają się obecnie jednym z głównych kierunków badań we współczesnej radioastronomii jest jak najbardziej normalny i oczekiwany. Wszelkiego rodzaju klasyfikacje i kategoryzacje obiektów astronomicznych są bardzo pomocne i pozwalają nam wprowadzić porządek w chaosie często bardzo różnorodnych własności obserwacyjnych, poprzez wskazanie tych najbardziej typowych obiektów, ograniczenie prac teoretycznych i modelowych właśnie do nich. Stworzenie ram klasyfikacji pozwala nam często w takich sytuacjach opracować unifikujący je model - tak jak stało się to z galaktykami aktywnymi. Jego powstanie nie oznacza jednak końca badań; wręcz przeciwnie. O ile ludzie, w tym naukowcy lubią jasne i czyste klasyfikacje, o tyle wydaje się że natura ich nie cierpi i wielokrotnie “przedstawia” nam obiekty w których mieszają się cechy obserwacyjne aktywnych galaktyk należących do zupełnie różnych kategorii. Badania tego typu obiektów są naturalnym rozszerzeniem wcześniejszych prac i często dostarczają nam cennych informacji pozwalających uszczegółowić nasze zrozumienie zagadnienia. Takie właśnie badania przeprowadziła

w swojej pracy doktorantka, skupiając się na klasie obiektów zwanych blazarami, ale wykazujących cechy obiektów należących do innych kategorii.

Przedstawiona praca doktorska składa się z czterech rozdziałów. Praca napisana została w języku polskim a jej zasadnicza część zawiera się na 80 stronach. Dysertacja zawiera 23 rysunki oraz 6 tabel, zaś zamieszczona na końcu tekstu zasadniczego bibliografia zawiera 123 pozycje.

Rozdział pierwszy pracy stanowi krótki, czterostronicowy wstęp w którym autorka przedstawia temat pracy oraz motywację stojącą za takim wyborem. Rozdział ten zawiera również krótki rys historyczny dotyczący początków radioastronomii oraz pierwszych obserwacji kwazarów i galaktyk aktywnych.

Drugi rozdział rozprawy przedstawia podstawowe założenia modelu unifikacji galaktyk aktywnych i wyjaśnia w jego kontekście cechy obserwacyjne podstawowych typów klasyfikacji galaktyk, ze szczególnym uwzględnieniem tzw. blazarów, czyli obiektów dla których kierunek strugi materii (dżetu) wyrzucanego przez akreującą czarną dziurę jest bliski linii widzenia obserwatora. W rozdziale tym autorka przedstawia również szczególnie interesującą podgrupę tych obiektów - blazary z rozciągniętą emisją radiową; to właśnie badania tego typu obiektów są głównym obiektem studiów przedstawionych w rozprawie. Autorka wspomina tutaj także o tym, że obserwacje tego typu obiektów w szczególności detekcja wspomnianej emisji rozciągniętej nie jest łatwa i wymaga stosowania odpowiednich, niestandardowych technik analizy danych, oraz wskazuje że rozwój technologiczny instrumentów obserwacyjnych, w szczególności interferometrów radiowych znacznie przyczynił się do tego iż taką emisję możemy wykryć. Następnie autorka przechodzi płynnie do opisu radioteleskopów które użyte zostały do zbierania danych analizowanych w rozprawie: radiointerferometru GMRT w Indiach, interferometru VLA (Nowy meksyk, USA) oraz europejskiej sieci radioteleskopów niskiej częstotliwości LOFAR.

Kolejne dwa rozdziały stanowią zasadniczą naukową część pracy; naturalnie oba są stosunkowo obszerne i zawierają po 30 stron. W rozdziale trzecim autorka przedstawia obiekt *SBS B1646+499*, blazara który jest głównym obiektem przeprowadzonych przez nią badań. Obiekt ten autorka określa jako "hybrydowy blazar z dyfuzyjną emisją radiową". Rozdział rozpoczyna się od opisu zebranych danych obserwacyjnych, przeprowadzonych z użyciem wspomnianych wcześniej radioteleskopów i zwięzłego opisu użytych metod analizy. Autorka przedstawia też podstawowe wyniki tych analiz, tzn. mapy radiowe badanego obiektu na kilku częstotliwościach radiowych. W krótkich podrozdziałach przedstawione są również najważniejsze cechy obserwacyjne wspomnianego blazara uzyskane z obserwacji w zakresie optycznym, podczerwonym i rentgenowskim, autorka posiłkuje się w tym względnie wynikami dostępnymi w literaturze. W kolejnej części rozdziału autorka zatrzymuje się nad jedną z najważniejszych cech obserwacyjnych *SBS B1646+499* która odróżnia go od typowych blazarów, czyli obserwowaną w tym obiekcie dyfuzyjną emisją radiową. Przeprowadzona analiza spektralna wyraźnie wykazuje obserwowaną na niskich częstotliwościach radiowych nadwyżkę promieniowania jądra obiektu, względem kształtu widma przewidzianego przez model, nadwyżka ta jak to wykazuje autorka (stosując sprytnie metody analizy danych) wynika właśnie z istnienia tej dodatkowej dyfuzyjnej emisji.

Rozdział czwarty rozprawy zawiera opis oraz interpretację wyników obserwacji, łącząc rezultaty uzyskane przez autorkę z wcześniejszymi wynikami uzyskanymi przez innych autorów. W rozdziale tym autorka przeprowadza analizę spektralną *SBS B1646+499*, w szczególności odtwarzając (prze-strzenne) widma zwartego jądra, dżetu oraz emisji rozciągniętej. Przeprowadzona analiza, choć w części ograniczona przez niedostateczną jakość obserwacji, wyraźnie wykazuje faktyczne hybrydowe cechy tego obiektu. Wskazuje również bardzo wyraźnie fakt asymetrii pomiędzy emisją rozciągniętą a emisją obserwowaną z dżetu czarnej dziury, co może być skutkiem ewolucji układu, w tym wypadku

najprawdopodobniej spowodowaną przez precesję dysku supermasywnej czarnej dziury zasilającej blazara. Podrozdział 4.2 jest jedną z najważniejszych części pracy i przedstawia interpretację uzyskanych wyników, zarówno w kontekście modelu unifikacji galaktyk aktywnych, jak również w porównaniu do innych obiektów wykazujących cechy podobne do badanego blazara. Interpretacja ta nie zamyka się wyłącznie do przeprowadzonych obserwacji radiowych, ale uwzględnia również rezultaty badań przeprowadzonych w innych zakresach promieniowania elektromagnetycznego. Na podstawie rezultatów obserwacji i z użyciem powszechnie akceptowalnych modeli autorka oblicza podstawowe parametry fizyczne poszczególnych składników układu, przy okazji potwierdzając w ten sposób jego hybrydowość. Rozdział kończy się krótkim podsumowaniem podanych powyżej faktów, w podsumowaniu tym autorka zwraca również uwagę czytelnika na istotność prowadzenia dalszych obserwacji, szczególnie w zakresie niskich częstotliwości radiowych, z użyciem instrumentów takich jak LOFAR - emisja dyfuzyjna ujawnia się szczególnie właśnie na niskich częstościach i choć autorka nie pisze tego wprost - może okazać się że wiele znanych od dawna obiektów stanowiących wzorcowe przykłady protoplastów różnych kategorii w modelu unifikacyjnym może wykazywać cechy hybrydowe.

Za najbardziej istotne wyniki przedstawionej pracy uważam:

- (i) wyczerpujący, przynajmniej na poziomie dostępnych obecnie danych obserwacyjnych opis ciekawego obiektu, jakim jest hybrydowy blazar *SBS B1646+499*. Szczególnie analiza danych radiowych pochodzących z obserwacji na niskich częstotliwościach radiowych, stanowiąca zarazem oryginalny wkład autorki w badania tego obiektu, jest niesłychanie cenna i nowatorska.
- (ii) poparta dowodami obserwacyjnymi próba wyjaśnienia nietypowej morfologii tego obiektu; autorka sugeruje tu że obserwowany brak symetrii dżetu względem płatów dyfuzyjnej emisji radiowej może być spowodowany przez precesję wywołaną przez efekt Lensa-Thirringa.
- (iii) niewątpliwe wykazanie, że wspomniany obiekt, jak również kilka innych wyraźnie wymyka się sztywnym regułom klasyfikacji galaktyk aktywnych, co wskazuje na jego hybrydowość; to również spowodowane może być burzliwą ewolucją tego typu obiektów
- (iv) wykazanie, że obserwacje radiowe prowadzone na niskich częstotliwościach mogą znacznie przyczynić się do poszerzenia naszej wiedzy na temat tego typu obiektów; w szczególności - jak to zaprezentowała doktorantka - przez wyjaśnienie nadwyżki w widmach tego typu obiektów jako efektów związanych z emisją struktur dyfuzyjnych.

Nie mam wątpliwości że rezultaty obserwacji i wyniki analiz przedstawione w rozprawie pani mgr Urszuli Pajdosz-Śmierciak, stanowią cenny wkład w rozwój naszej wiedzy w zakresie obserwacji, interpretacji i mechanizmów emisji aktywnych galaktyk. Choć autorka zajęła się (w zasadzie) tylko jednym obiektem tego typu wyniki przez nią uzyskane bardzo dobrze wpisują się w obecnie rozwijane kierunki badań w tej dziedzinie. Szczególnie że, jak już wspomniałem we wstępie niniejszej recenzji, w każdych badaniach moment przejścia od sztywnych ram klasyfikacji i kategoryzacji obiektów i teorii do próby opisanie wszystkich przypadków które się sztywnej klasyfikacji opierają, uważam za bardzo istotny w rozwoju danej dziedziny.

Praca zdecydowanie wskazuje na to, że doktorantka w sposób bardziej niż zadowalający opłatała techniki obserwacyjne i metody analizy danych i że wykazuje się w tych kwestiach ściśle naukowym podejściem. Opis użytych instrumentów i metod jest (w większości aspektów) pełny i zrozumiały, choć momentami nieco skąpy; autorka nie używała jednak jakichś bardzo niestandardowych metod więc zrozumienie dlaczego i w jaki sposób przeprowadza swoją analizę nie nastręcza problemów. Pani mgr. Urszula Pajdosz-Śmierciak w swojej pracy doktorskiej wykazuje, że potrafi w sposób właściwy interpretować dane i przeprowadzić ich naukową dyskusję, potrafi też w sposób spójny połączyć uzyskane przez siebie rezultaty z wynikami opublikowanymi wcześniej.

Jesli chodzi o stronę merytoryczną to mam jedynie kilka drobnych pytań, wątpliwości lub uwag::

1. w Rozdziale 2.1 strona 18, pierwszy akapit: autorka pisze że *Radiowy schemat unifikacyjny wyjaśnia pochodzenie obiektów zdominowanych przez jądro, posiadających zatem płaskie widmo...* - nie dla każdego czytelnika musi być oczywiste, że te dwa aspekty są ze sobą związane, przywołanie właściwości spektralnych różnych mechanizmów promieniowania mogłoby rozstrzygnąć tę wątpliwość. Takiej informacji nie ma jednak we wcześniejszych akapitach rozdziału (choć pojawia się w dalszych częściach pracy).
2. w Rozdziale 3.2 autorka wspomina o polaryzacji promieniowania badanego obiektu wykrytej dzięki obserwacjom VLA. Rozumiem że chodzi tu o polaryzację liniową?
3. w Rozdziale 3.3.1 na stronie 46 autorka wspomina o alternatywnej metodzie analizy danych interferometrycznych z sieci teleskopów LOFAR, metodzie która wykorzystuje oprogramowanie *killMS*. Jednakże - przynajmniej w tym miejscu pracy - autorka nie wspomina czy użyła tej metody; a jeśli tak ciekawym byłoby porównanie rezultatów z tymi uzyskanymi za pomocą *LOFAR Facet Calibration*.
4. Rysunki 3.7 i 3.8 - małe panele znajdujące się na nich, przedstawiające wyniki kalibracji z użyciem metody *Factor* są w wersji drukowanej mało czytelne (ze względu na kontrast i rozmiary) co podaje w wątpliwość sens ich umieszczania w tej formie.
5. Rozdział 3.4, wzory na stronie 55 opisujące wyniki dopasowań spektralnych - nigdzie nie podano w jakich jednostkach wyrażają one strumień i częstotliwość obserwacyjną. Domyślnie przyjąłbym że strumień źródeł wyrażony jest w mJy, a częstotliwość w MHz? Nie ma to znaczenia dla uzyskanego indeksu widmowego (który jest w tych dopasowaniach najważniejszy), ale dla każdego podanego wzoru powinny wyszczególnione zostać jednostki.
6. Rysunki 3.11 - 3.13 na końcu Rozdziału 3 prezentują wyniki dopasowań spektralnych przeprowadzonych w celu znalezienia indeksów widmowych. Dlaczego na wszystkich 3 rysunkach skala na osi *X*-ów (częstotliwości) jest tak szeroka, że punkty obserwacyjne, a co za tym idzie również dopasowane linie pokrywają nie więcej niż lewą ćwiartkę ramki rysunku? Jest to znaczące marnotrawstwo miejsca na rysunku i sprawia że same dane stają się mniej czytelne.

Pomimo tych kilku wymienionych powyżej uwag należy potraktować je jedynie jako drobne usterki. Pod względem merytorycznym rozprawa przygotowana została bardzo dobrze a moje uwagi dotyczą prawie wyłącznie drobnych nieścisłości i problemów z prezentacją rezultatów.

Od strony edytorskiej praca również przygotowana została poprawnie, choć i tu zdarzyło się kilka drobnych wpadek. W kilku miejscach autorka popełniła drobne błędy edytorskie w postaci tzw. wdów, sierot i bękartów; najlepszym przykładem niech będzie to, iż ostatnia strona zasadniczego tekstu pracy zawiera dokładnie jedno słowo które brzmi: *niekompletne*. W kilku miejscach pojawiają się niefortunne sformułowania, w rodzaju *nuklearnego dżetu* (str. 32) zamiast po prostu dżetu, wszak dla każdego czytelnika zorientowanego w zagadnieniach związanych z badaniami aktywnych jąder galaktyk oczywistym jest że każdy dżet ma swój początek w jądrze obiektu, które w języku ang. określa się słowem *nucleus*) - stąd pewnie ten "nuklearny" dżet. W podobnym kontekście autorka w kilku miejscach używa określenia *dżety jądrowe* (lub pokrewnych). Problemy z tego typu kalkami językowymi pojawiają się również w kilku innych miejscach: np. str. 21: *Fakt... (tu nie istotne jaki) ... wydaje się być konsystentny...* - zapewne od ang. *consistent* co przetłumaczyłbym raczej jako zgodny lub spójny. Również na str. 27 podobny problem: występuje tam określenie: *powierzchnia kolektywna GMRT* - tu raczej chodziło zapewne o angielskie określenie *collecting area* które na język polski tłumaczy się najczęściej jako "powierzchnia zbierająca"; alternatywnie kalka ta może mieć swe źródło w angielskim określeniu *collective area* - wtedy należałoby to przetłumaczyć jako "całkowita" lub "sumaryczna powierzchnia". Innym kilkukrotnie powtarzającym się błędem jest też

moim zdaniem fakt, że kilku miejscach, gdzie autorka opisuje wygląd omawianych obiektów na mapach radiowych używa - szczególnie w odniesieniu do widocznej tam emisji rozciągłej - określenia iż emisja ta znajduje się *naokoło* centralnego obiektu. Wydaje mi się to zbyt potocznym określeniem; osobiście użyłbym raczej słów "wokół" lub "dookoła".

Muszę jednak podkreślić że tego typu błędy nie wpływają znacząco na ogólny odbiór pracy, która napisana jest w przeważającej większości poprawnym i naukowo ścisłym językiem, odpowiednim dla pracy doktorskiej.

Podsumowując, pomimo powyższych drobnych uwag krytycznych, uważam, że mgr. Urszula Pajdosz-Śmierciak uzyskała i przedstawiła bardzo ciekawe i znaczące dla środowiska naukowego wyniki, które przyczyniają się lepszemu zrozumieniu morfologii, budowy fizycznej i ewolucji aktywnych jąder galaktyk. **Stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa spełnia ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane pracom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie mgr Urszuli Pajdosz-Śmierciak do dalszych etapów postępowania doktorskiego.**

dr hab. Wojciech Lewandowski



Zielona Góra, 15 marca 2019