

dr hab. Jarosław Kijak
Instytut Astronomii im. prof. Janusza Gila
Wydział Fizyki i Astronomii
Uniwersytet Zielonogórski

Recenzja rozprawy doktorskiej magistra Wojciecha Jurusika

„Properties of radio emission and radio spectra of galaxies at low radio frequencies”

Rozprawa poświęcona jest badaniom emisji radiowej bliskich galaktyk, w szczególności w zakresie niskich częstotliwości radiowych. Jednym z podstawowych aspektów tych badań jest wyznaczenie widm tego typu radioźródeł w szerokim zakresie promieniowania fali radiowej. Ponieważ analiza charakterystyk widmowych jest źródłem informacji o mechanizmach promieniowania radiowego tych obiektów. Jedną z cech widm radioźródeł jest występujące załamanie na charakterystycznych częstotliwościach obserwacyjnych, co również jest obserwowane w promieniowaniu galaktyk. Interpretacja fizyczna takich własności widmowych jest jednym z kluczowych zagadnień badawczych również dla bliskich galaktyk.

Praca napisana jest pod opieką dr hab. Krzysztofa Chyżego w języku angielskim i składa się z krótkiego streszczenia również w języku polskim, 5 rozdziałów, listy rysunków, tabel oraz skrótów zamieszczonych w rozprawie. Ponadto, zawiera bardzo obszerną bibliografię i pięć dodatków. Na pracę składają się dwa aspekty badań. Pierwszy to analiza danych obserwacyjnych galaktyki NGC 6946 uzyskanych za pomocą jednego z najnowszych instrumentów radiowych, interferometru LOFAR na częstotliwości obserwacyjnej 144 MHz. Drugim aspektem badań przedstawionym w rozprawie jest trójwymiarowe modelowanie numeryczne emisji radiowej bliskich galaktyk w ścisłym związku z dostępnymi już wynikami obserwacyjnymi tych radioźródeł, w szczególności wyznaczonych widm promieniowania.

W pierwszym rozdziale autor rozprawy przedstawił motywację i podstawowe cele swoich badań. W zakresie podstawowej wiedzy za promieniowanie radiowe typowych galaktyk odpowiadają, w ogólności, dwa procesy: emisja termiczna w postaci mechanizmu swobodno-swobodnej emisji i absorpcji oraz emisja nietermiczna, za którą jest odpowiedzialne promieniowanie synchrotronowe. Dotychczasowe badania bliskich galaktyk były skupione na obserwacjach w zakresie dość wysokich częstotliwości obserwacyjnych: od kilkuset megahertzów do kilkudziesięciu gigahertzów. Zakres tych badań wynikał głównie z możliwości technicznych dostępnych instrumentów badawczych. Zaproponowane badania poniżej 300 MHz wydają się naturalne i celowe, tym bardziej w momencie powstania nowych instrumentów radioastronomicznych pozwalających przeprowadzać obserwacje na falach długich, gdzie kluczowym aspektem badań jest występowanie charakterystycznego załamania w widmie. Następnie, w rozdziale tym opisane są podstawowe mechanizmy promieniowania radiowego galaktyk. Opisane są również wyzwania dotyczące obserwacji na niskich częstotliwościach (poniżej 150 MHz). Na koniec tego rozdziału autor rozprawy zamieszcza informacje na temat nowego radioteleskopu, interferometru LOFAR, przeznaczonego do obserwacji nieba w zakresie od 10 do 240 MHz.

Rozdział drugi poświęcony jest obserwacjom i analizie danych znanej bliskiej galaktyki NGC 6946. Galaktyka ta badana jest już od kilkudziesięciu lat i własności widmowe w zakresie wyższych częstotliwości są dobrze określone w przeciwieństwie do niskich częstotliwości obserwacyjnych, gdzie analiza taka jest dość uboga. Obserwacje w zakresie 115-180 MHz wpisują się w główne cele rozprawy. Najważniejsze aspekty badań poruszane w tym rozdziale to swobodno-swobodna absorpcja poniżej 300 MHz, występowanie niskoenergetycznych elektronów promieniowania kosmicznego oraz oszacowania wartości pola magnetycznego.

Ważnym wynikiem jest pokazanie, że widoczny dysk emisji radiowej jest o wiele większy niż dysk optyczny. Ponadto, analiza widma zintegrowanego badanej galaktyki nie pokazuje wypłaszczenia na niskich częstotliwościach obserwacyjnych a widmo lokalne z centralnej części galaktyki takie załamanie posiada. Brak załamania w zintegrowanym widmie może wykluczać silną absorpcję termiczną a istnienie takiego załamania w widmie lokalnym sugeruje absorpcję spowodowaną zjonizowanym gazem w obłokach HII.

W dalszej części tego rozdziału autor rozprawy zajmuje się szczegółową analizą emisji radiowej galaktyki NGC 6946 na którą składają się emisja synchrotronowa oraz termiczna emisja swobodno-swobodna. W analizie porównawczej używa przeanalizowanych wcześniej danych obserwacyjnych na częstotliwości 144 MHz i danych archiwalnych uzyskanych na częstotliwości 1.4 GHz. Na koniec tego rozdziału zamieszczona jest dyskusja dotycząca interpretacji otrzymanych wyników w kontekście fizycznych mechanizmów odpowiedzialnych za obserwowane promieniowanie radiowe galaktyki spiralnej NGC 6946 na częstotliwości 144 MHz. Przykładowo, opisany jest rozkład promieniowania kosmicznego i ewolucja jego widma energii w ośrodku międzygwiazdowym w procesie dyfuzji.

Najważniejsze wyniki z tej części rozprawy to: brak znaczącego wpływu ośrodka międzygwiazdowego na kształt zintegrowanego widma na niskich częstotliwościach aż do 144 MHz, absorpcja termiczna w widmie lokalnym z centralnej części galaktyki oraz oszacowanie wartości pola magnetycznego galaktyki.

W rozdziale trzecim i czwartym autor rozprawy zajmuje się kompleksowym modelowaniem 3D zintegrowanych widm bliskich galaktyk podobnych do M51 i M82. Jest to spójne z wnioskiem postawionym na koniec rozdziału drugiego, że brak jest w literaturze szczegółowego modelu w pełni uwzględniającego fizyczne własności ośrodka międzygwiazdowego. W rozdziale 3 został zaprezentowany podstawowy model emisji radiowej galaktyki uwzględniający jej geometrię i podstawowe parametry zjonizowanego gazu takie jak: temperatura elektronowa, miara emisji, gęstość elektronowa i rozmiar. Prosty model galaktyki w formie dobrze wymieszanego termicznego i synchrotronowo promieniującego ośrodka nie odtwarza obserwowanych widm galaktyki. Z tego powodu w modelu uwzględniono galaktyczne halo i jego wpływ na kształt widma. Została pokazana różnorodność kształtu widm w zależności od ustalonych parametrów.

Ogólny wniosek w tej części rozprawy, to brak możliwości jednoznacznego odtworzenia obserwowanych zintegrowanych widm galaktyk, w szczególności, ze względu na bardziej złożoną strukturę i skład ośrodka międzygwiazdowego w galaktykach, niż użyty jednorodny zjonizowany gaz.

Rozdział czwarty zawiera szczegółowe modele 3D promieniowania radiowego galaktyk typu M51 i M81 wykorzystujące informacje o rozkładzie zjonizowanego gazu w galaktykach, emisji synchrotronowej plazmy i transportu promieniowania kosmicznego. W obu przypadkach zostały podane wzory na rozkład zjonizowanego gazu oraz emisję synchrotronową. Ponadto, wykorzystano dostępne ograniczenia obserwacyjne na użyte parametry w modelowaniu 3D. W końcowym efekcie autor rozprawy otrzymał widma radiowe analizowanych galaktyk i porównał je z widmami wyznaczonymi na podstawie dostępnych w literaturze danych obserwacyjnych w szerokim zakresie częstotliwości.

Wyniki modelowania wskazują, że zintegrowane widmo galaktyki typu M51 pokazuje załamanie poniżej 20 MHz. Natomiast dla galaktyki typu M82 o silnej aktywności gwiazdotwórczej załamanie w widmie występuje pomiędzy 200 a 400 MHz. W obu przypadkach odpowiedzialna jest za to absorpcja termiczna. Wyniki modelowania pokazują również efekty absorpcji termicznej w widmach z centralnej części galaktyk, dla M51 pomiędzy 100 – 200 MHz, a dla M82 około 1 GHz. Ponadto, załamania widm lokalnych są zależne od nachylenia dysków galaktyk. W rozdziale 5 zostało przedstawione spójne podsumowanie otrzymanych wyników badań w rozprawie.

Na koniec, chciałbym stwierdzić, że autor rozprawy wykazał się teoretyczną wiedzą oraz znajomością procedur obserwacji i analizy danych radioźródeł promieniowania ciągłego, wykorzystując aktualnie dostępne oprogramowanie do tego typu specjalistycznej analizy. W efekcie otrzymał ciekawe i wartościowe wyniki dotyczące interpretacji kształtu widm radiowych galaktyki NGC 6946. W badaniach dotyczących modelowania 3D bliskich galaktyk rozwinął numeryczny model emisji uwzględniający równanie transferu promieniowania radiowego włączając do tego efekty projekcji. Warto podkreślić, że wyniki badań modelowych zostały już opublikowane w czasopiśmie naukowym *Astronomy & Astrophysics*, gdzie mgr Wojciech Jurusik jest drugim autorem w publikacji wieloautorskiej liczącej kilkudziesięciu autorów. Autor rozprawy uzyskał ciekawe oryginalne wyniki naukowe, które mogą być podstawą dalszych badań nad mechanizmami promieniowania radiowego bliskich galaktyk.

Uwagi i pytania:

1. Wyniki zawarte w części poświęconej analizie galaktyki NGC 6946 byłyby jeszcze bardziej wartościowe jakby zawierały analizę wykonanych obserwacji w zakresie bardzo niskich częstotliwości pomiędzy 30 a 100 MHz. Autor nadmienia, że obserwacje te zostały już przeprowadzone. Jeżeli istnieją już jakiegokolwiek wstępne wyniki analizy tych obserwacji to bardzo chętnie zobaczę je podczas obrony.
2. Autor rozprawy przedstawił analizę danych obserwacyjnych galaktyki NGC 6946 jednak nie wykorzystuje tych wyników do badań modelowych tej galaktyki. Stwierdzając tylko lakonicznie, że parametry obserwacyjne galaktyki M51 są lepiej opisane w literaturze. Oczekiwałbym, spójnego przedstawienia porównawczego dostępnych informacji dla obu tych obiektów, co stanowiłoby dla czytelnika oczywisty powód takiego wyboru.
3. Brak jest w spisie rysunków informacji o rysunku numer 1.1.

4. Rysunki 1.5 i 1.6 są ze względu na swoje rozmiary zbyt mało czytelne.
5. Autor w rozdziale 2.4.1 nadmienia, że wartości strumienia otrzymane poniżej 100 MHz przez innych autorów są niedoszacowane i nie uwzględnia ich w analizie przedstawionej na rysunku 2.5. Jednak później podaje wartość indeksu spektralnego otrzymanego przy użyciu tych wartości. Sądzę, że dla lepszego zrozumienia wyniku na rysunku 2.5 wartości strumienia na tych częstotliwościach powinny być również zamieszczone, pomimo nie uwzględnienia ich w przedstawionej analizie.
6. Na stronie 57 autor informuje, że indeks spektralny jest mniejszy od -0.5 w kontekście opisu płaskiego widma. Jednak wartość indeksu mniejsza od -0.5 raczej sugeruje, że widmo będzie bardziej strome a nie płaskie.
7. W rozprawie autor zamieścił cztery krótkie dodatki zawierające podstawowe informacje dotyczące problematyki badawczej w rozprawie np. promieniowanie kosmiczne, ośrodek międzygwiazdowy, czy pole magnetyczne. Uważam, że takie informacje powinny znaleźć się w pierwszej części rozprawy dotyczącej podstawowej wiedzy na temat promieniowania radiowego galaktyk, która przedstawiona jest na 7 stronach tekstu. Łącząc obie części w całość daje to 14 stron spójnej podstawowej wiedzy na poruszany problem badawczy w rozprawie, która liczy ponad 100 stron. Chyba, że był ku temu jakiś szczególny powód. Informacje dotyczące szczegółów modelowania jak najbardziej powinny się znajdować w dodatku na końcu rozprawy.

Podsumowując, mimo powyższych uwag uważam, że przedstawiona do oceny rozprawa magistra Wojciecha Jurusika stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i spełnia ustawowe wymagania stawiane pracą doktorską. Wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Zielona Góra, 18 marca 2019 r.



dr hab. Jarosław Kijak, prof. UZ