

Ocena rozprawy doktorskiej mgr. Wojciecha Jurusika
pt. „Properties of radio emission and radio spectra of galaxies
at low radio frequencies”

Recenzowana rozprawa, w ogólnym ujęciu, dotyczy badań nad rolą procesów fizycznych w kształtowaniu widm bliskich galaktyk na niskich częstotliwościach radiowych. Należą do nich termiczna absorpcja, propagacja nisko-energetycznych elektronów promieniowania kosmicznego (EPK) i związanych z nimi mechanizmów utraty energii. Pierwsza część rozprawy opisuje badania emisji radiowej na niskich częstotliwościach galaktyki NGC 6946 ze szczególnym uwzględnieniem absorpcji termicznej. Kolejne części przedstawiają wyniki symulacji numerycznych takiej emisji gwiazdotwórczej z uwzględnieniem wielu czynników fizycznych i geometrii, które mogą wpływać na ostateczny kształt widma galaktyki.

W ostatnich kilkunastu latach obserwacje radiowe na niskich częstotliwościach przeżywają prawdziwy renesans dzięki postępowi technologicznemu, który przyczynił się do efektywnego wykorzystania sfazowanych macierzy dipoli, a także zaawansowanych technik kalibracji i obrazowania potrzebnych do pokonania na przykład efektów jonosferycznych. Współczesne badania astronomiczne mogą wykorzystywać pełne spektrum radiowe, a kombinacja różnych zakresów częstotliwości jest niezwykle potężnym narzędziem naukowym. Wysokiej jakości obserwacje na najniższych częstotliwościach radiowych wykonywane są obecnie przez trzy instrumenty: Long Wavelength Array (LWA), Murchison Widefield Array (MWA) oraz LOw Frequency Array (LOFAR). To właśnie m.in. z obserwacji wykonanych instrumentem LOFAR korzysta autor tej pracy aby badać rozległą emisję radiową w halo galaktyk, emisję termiczną w ich widmach, zjawisko EPK oraz ich pola magnetyczne. Polska jest bardzo zaangażowana w projekt LOFAR. Trzy spośród jedenastu stacji zagranicznych instrumentu LOFAR znajdują się w Polsce, w tym jedna należy do Uniwersytetu Jagiellońskiego. Ważną cechą instrumentu LOFAR jest jego ogromna czułość i zdolność do tworzenia wysoce szczegółowych map nieba. Obecnie żaden inny radioteleskop na świecie obserwujący na niskich częstotliwościach nie może pochwalić się takimi parametrami.

Rozprawa doktorska Pana Jurusika jest oparta na własnym materiale obserwacyjnym galaktyki gwiazdotwórczej NGC 6946 uzyskany przez autora w czasie pierwszego naukowego cyklu obserwacyjnego instrumentu LOFAR. Ponadto Pan Jurusik korzysta również umiejętnie z danych archiwalnych oraz literaturowych, bez których interpretacja otrzymanych wyników dotyczących tej galaktyki byłaby w wielu aspektach wręcz niemożliwa. Jednak wyniki prac nad galaktyką NGC 6946 nie zostały jeszcze opublikowane. Dodatkowo autor rozprawy stworzył numeryczny model 3D emisji gwiazdotwórczej galaktyk, aby lepiej zrozumieć oraz przewidzieć kształt niskoczęstotliwościowych widm radiowych galaktyk. Prezentowane wyniki wskazują, że Pan Jurusik biegle opanował metodę obserwacji interferometrycznych oraz bardzo zaawansowane metody redukcji i opracowania danych z instrumentu LOFAR. Jest to bardzo cenna umiejętność w czasach, w których tego typu danych zaczyna przybywać lawinowo. Równie ważne są umiejętności programistyczne Pana Jurusika, które wykazał w rozprawie i które są istotną częścią publikacji *Chyży, Jurusik i in. 2018, A&A, 619, A36.*

Pan Wojciech Jurusik jest także pierwszym autorem jednej publikacji i współautorem dziewięciu innych recenzowanych prac, które dotyczą analizy obserwacji oraz modelowania emisji galaktyk normalnych na niskich częstotliwościach. I chociaż nie są one bezpośrednio związane z prezentowaną rozprawą stanowią one dobry dorobek naukowy Pana Jurusika na tym etapie kariery naukowej.

Rozprawa ma czytelny, logiczny układ i jest napisana w języku angielskim. Jako osobie nieanglojęzycznej jest mi trudno w pełni ocenić poprawność języka zakresie gramatycznym i interpunkcyjnym. Niemniej jednak praca jest dla mnie zrozumiała. W żadnym z fragmentów pracy nie mam wątpliwości co do sensu prowadzonych wywodów i poza nielicznymi błędami edytorskimi typu: literówka, brak lub powtórzenie wyrazu, nie znajduje w pracy większych problemów językowych.

Praca podzielona jest na pięć rozdziałów. Zawiera spis treści, obszerną bibliografię, spis tablic, rysunków i akronimów oraz pięć dodatków. Pierwszy rozdział rozprawy stanowi wprowadzenie w temat procesów odpowiedzialnych za powstawanie emisji radiowej w tzw. normalnych galaktykach oraz prezentuje instrument LOFAR i wykonany nim pierwszy przegląd nieba północnego w zakresie niskich (30-70 MHz) i nieco wyższych (120-160 MHz) częstotliwości radiowych. I tak autor opisuje mechanizm powstawania nietermicznej (synchrotronowej) emisji radiowej, która *de facto* pokazuje nam rozmieszczenie elektronów promieniowania kosmicznego w galaktyce. Taka emisja, a co za tym idzie kształt jej widma, może zostać zmieniona poprzez różne procesy utraty energii, które autor objaśnia w tym rozdziale oraz w dodatku A. Dalej autor dyskutuje możliwość przemieszczania się elektronów PK daleko od miejsc ich przyspieszania w procesie dyfuzji i adwekcji. I wreszcie omawia również mechanizm powstawania emisji i absorpcji termicznej. Więcej szczegółowych informacji na temat wymienionych procesów i związanych z nimi zagadnień (np. ośrodka międzygwiazdowego i pola magnetycznego) znajduje się w dodatkach A – D. Rozdział pierwszy prezentuje również cel pracy i motywację która skłoniła autora do podjęcia tego typu badań. Podsumowując, zawarta w rozdziale pierwszym i dodatkach wiedza teoretyczna podparta licznymi odniesieniami do fachowej, bieżącej literatury pokazuje dobre rozeznanie autora w literaturze przedmiotu.

Podstawową częścią rozprawy są rozdziały drugi, trzeci i czwarty, które zawierają oryginalny wkład autora w badanie zagadnienia emisji radiowej bliskich galaktyk na niskich częstotliwościach radiowych. Celem tej rozprawy doktorskiej było zrozumienie tego jak różne procesy fizyczne obecne w galaktykach wpływają na kształt ich widm. Wyniki analizy szczegółowych obserwacji galaktyki NGC 6946 oraz modelowania 3D emisji radiowej galaktyk gwiazdotwórczych przyniosły kilka ciekawych konkluzji, które pozytywnie weryfikują postawiony w rozprawie cel. Mimo wszystko jednak, jak wskazuje sam autor, dopiero większa ilość niskoczęstotliwościowych obserwacji radiowych dla dużej grupy bliskich galaktyk może być w przyszłości rozstrzygająca w badanym temacie.

I tak, w rozdziale czwartym zaprezentowane zostały wyniki obserwacji radiowych LOFAR HBA na częstotliwości 144 MHz galaktyki NGC 6946. Dobrej jakości obserwacje na tak niskiej częstotliwości zostały wykonane dla tej galaktyki po raz pierwszy i ujawniły bardzo rozległą otoczkę synchrotronową wokół tego obiektu i dwa załamania w profilu radialnym tej emisji. Według autora taki obraz jest wynikiem przemieszczania się niskoenergetycznych elektronów PK na duże odległości w wyniku mniejszych start energii, jakie zachodzą na niższych częstotliwościach. Zintegrowane widmo radiowe NGC 6946 nie wykazuje zmian do częstotliwości 144 MHz, które można by przypisać absorpcji termicznej. Jednak lokalne widma, z centrum galaktyki i z obszarów III, wskazują na taką możliwość. Aby rozstrzygnąć sugestie i wątpliwości znalezione w trakcie badań, autor rozprawy wskazuje na konieczność kolejnych obserwacji galaktyki NGC 6946, tym razem przy pomocy LOFAR LBA na częstotliwości 50 MHz. Taki wniosek obserwacyjny został przez autora złożony, rozpatrzony pozytywnie a obserwacje wykonane. Nie jest zatem dla

mnie zrozumiałe, dlaczego wyniki tych obserwacji nie znalazły się w tej rozprawie. Być może wówczas autor nie musiałby wyrażać przypuszczeń co do niektórych proponowanych wyjaśnień.

Rozdziały trzeci i czwarty zawierają kolejno opis modelu 3D emisji radiowej normalnych galaktyk stworzonego przez autora oraz jego praktyczne wykorzystanie do modelowania widm emisji radiowej galaktyk typu M51 i M82. W odróżnieniu od istniejącego od dawna jednowymiarowego modelu emisji radiowej normalnych galaktyk, model 3D stworzony przez autora przewiduje emisję i kształt widm galaktyk w zależności od kąta widzenia. Uwzględnia on również nie tylko wkład od termicznego i synchrotronowego ośrodka galaktyki ale również wiele parametrów emisji synchrotronowej galaktycznego halo. Tak zbudowany model sprawdził się w kompleksowym modelowaniu zintegrowanych widm galaktyk typu M51 i M82 opisanym w rozdziale czwartym i publikacji *Chyży, Jurusik i in. 2018, A&A, 619, A36*. Autorzy pracy pokazali m.in., że absorpcja termiczna wpływa na kształt widm galaktyk typu M51 dopiero na bardzo niskich częstotliwościach radiowych, poniżej 20 MHz. W przypadku obiektów o silnej aktywności radiowej, jak M82, takie efekty widoczne są pomiędzy 200 a 400 MHz, natomiast wzrost jasności w widmie poniżej 20 MHz spowodowany jest emisją synchrotronową galaktycznego halo. Niemniej jednak lokalnie, np. w centrach galaktyk, absorpcja termiczna silnie wpływa na wartość emisji radiowej powodując przełamania w widmie radiowym na wyższych częstotliwościach w obu rozważanych typach galaktyk. Autor rozprawy wskazuje więc na potrzebę dobrej znajomości własności lokalnego ośrodka międzygwiazdowego. Dobrym testem na przewidywania stworzonego przez autora modelu będą również nowe obserwacje normalnych galaktyk radiowych na częstotliwościach poniżej 50 MHz. Na razie jednak LOFAR przede wszystkim realizuje obserwacje radiowe w pasmie HBA.

Podsumowując zasadniczą część rozprawy stwierdzam, że wkład autora w opracowanie przedstawionych w niej wyników jest duży i są one interesujące dla społeczności astronomicznej. Nie mam istotnych zastrzeżeń co do zawartości i jakości merytorycznej rozprawy. Część prezentowanych wniosków została już opublikowana w postaci jednej pracy w międzynarodowym czasopiśmie astronomicznym zatem recenzowana przez kompetentnych specjalistów. Mam nadzieję, że również wyniki pozostałych analiz zostaną w przyszłości opublikowane.

Mam jednak kilka mniejszej wagi zastrzeżeń do pracy, które wymieniam poniżej w kolejności pojawienia się w tekście rozprawy:

- W pracy zdarzają się błędy edytorskie typu literówka, powtórzenie wyrazu lub jego brak np. roz. 2.4.1, str. 51, trzeci akapit, ostatnie zdanie.

- Rozdział 1.3.1, ostatni akapit. Autor wymienia kilka jasnych źródeł radiowych podając wartości ich strumienia ale bez podania częstotliwości radiowej i wyjaśnienia jednostki pomiarowej.

- Pierwszy akapit rozdziału 2.1 jest dla mnie mylący. Najpierw autor opisuje galaktykę NGC 6946 jako izolowaną (bez współtowarzystwa galaktyk karłowatych) co stanowi wyjątek, żeby na końcu stwierdzić, że tak jednak nie jest. Ostatecznie nie jest dla mnie jasne co oznaczają oba te przypadki i czy mają jakiś wpływ na prezentowane badania.

- Na rysunku 2.1 brakuje nazwy prezentowanej galaktyki oraz nazwy instrumentu, którym wykonana została mapa wodoru HI. Co oznacza czarna kropka w centrum galaktyki ?

- W rozdziale 2.4.2 autor opisuje dopasowania lokalnego widma dla centrum galaktyki NGC 6946 dwoma modelami. Na jakiej podstawie autor przyjmuje, że temperatura termicznych elektronów wynosi 10^4 K ? Jaka jest wartość indeksu spektralnego α_{nt} dla modelu B ? Ponadto, wartości testu chi-kwadrat dla obu modeli pokazują tzw. nadmierne dopasowanie (ang. overfitting) czyli mamy zbyt mało danych obserwacyjnych, aby uzasadnić parametry modelu i prawidłowo przewidzieć przyszłe dane i kształt widma. Innymi słowy wartość wkładu termicznego na poziomie 12%, którą podaje autor nie jest zbyt wiarygodna.

- Na Rysunku 2.8 mylący jest opis osi y. Wynika to z tego, że w przypadku tej pracy, która dotyczy radioastronomii, słowo 'frequency' jest od początku jednoznacznie zdefiniowane i oznacza częstotliwość obserwacji. Myślę, że sama mapa byłaby wystarczającą ilustracją występowania emisji termicznej. Nie zauważyłam, żeby przedstawienie tego samego zagadnienia w postaci histogramu wniosło coś istotnego do dyskusji.

- Podobnie nieadekwatny opis osi y znajduje się na histogramie na Rysunku 2.10.

- W rozdziale 2.6 obliczając wartość pola magnetycznego galaktyki NGC 6946 autor przyjął do obliczeń wartość indeksu spektralnego $\alpha_{nt} = -0.8$ z pracy Condon 1992. Dlaczego autor nie wykorzystał tutaj swoich obliczeń indeksu spektralnego zaprezentowanych w rozdziale 2.4.1 (str. 52)?

Wskazane wyżej niedociągnięcia nie wazą znacząco na wartości przedstawionej do oceny rozprawy.

Uważam, że rozprawa doktorska mgr. Wojciecha Jurusika stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i spełnia wszelkie ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim. Wnioskuje o dopuszczenie mgr. Wojciecha Jurusika do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Magdalena Kunert-Bajraszewska

Magdalena Kunert-Bajraszewska