

Uniwersytet Jagielloński
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej
Astronomia



ROZPRAWA DOKTORSKA

Niskoenergetyczna, dyfuzyjna emisja blazarów a model unifikacyjny aktywnych galaktyk

Urszula Pajdosz-Śmierciak

nr indeksu: 1063660

Promotor: dr hab. Marian Soida
Zakład Radioastronomii i Fizyki Kosmicznej OA UJ

Promotor pomocniczy: dr Błażej Nikiel-Wroczyński
Zakład Radioastronomii i Fizyki Kosmicznej OA UJ

Kraków, 2019

Oświadczenie

Ja, niżej podpisana Urszula Pajdosz-Śmierciak (nr indeksu: 1063660), doktorantka Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego oświadczam, że przedłożona przeze mnie rozprawa doktorska pt. *Niskoenergetyczna, dyfuzyjna emisja blazarów a model unifikacyjny aktywnych galaktyk* jest oryginalna i przedstawia wyniki badań wykonanych przeze mnie osobiście, pod kierunkiem dr. hab. Mariana Soidy oraz pod kierunkiem promotora pomocniczego dr. Błażeja Nikiel-Wroczyńskiego. Pracę napisałam samodzielnie.

Oświadczam, że moja rozprawa doktorska została opracowana zgodnie z Ustawą o prawie autorskim i prawach pokrewnych z dnia 4 lutego 1994 r. (Dziennik Ustaw 1994 nr 24 poz. 83 wraz z późniejszymi zmianami).

Jestem świadoma, że niezgodność niniejszego oświadczenia z prawdą ujawniona w dowolnym czasie, niezależnie od skutków prawnych wynikających z ww. ustawy, może spowodować unieważnienie stopnia nabytego na podstawie tej rozprawy.

Kraków, 4.02.2019

podpis doktorantki

STRESZCZENIE

Praca doktorska pt. *Niskoenergetyczna, dyfuzyjna emisja blazarów a model unifikacyjny aktywnych galaktyk* zawiera szczegółową analizę blazara SBS B1646+499, łączącego w sobie właściwości lacertyd oraz kwazarów z płaskim widmem radiowym. Została ona wykonana w oparciu o dostępne dane archiwalne oraz dane z dedykowanych obserwacji prowadzonych na interferometrach radiowych LOFAR, GMRT oraz JVL A. To mało znane źródło okazało się wykazywać rozciągłą (w przybliżeniu 1 Mpc w osi dżetu) emisję radiową w formie dwóch płatów. Jest to pierwszy przypadek, gdy tak rozciągła emisja wystąpiła w AGN ie klasy 0. Udowodniono, że wykonując niskoenergetyczne obserwacje, o dużej czułości, wysokiej dynamice i zdolności rozdzielczej można prześledzić przeszłe fazy aktywności blazarów, które w tym przypadku powinny być rozpatrywane pod kątem schematu unifikacyjnego aktywnych galaktyk. SBS B1646+499 bowiem – poprzez prawdopodobny mechanizm *wleczenia układów Lense’a-Thirringa* – zmienił kierunek propagacji dżetu i przekształcił się z radiogalaktyki, a więc obiektu klasy 2 aktywnych galaktyk, w blazara, posiadającego właściwości mieszane obu podtypów aktywnych galaktyk klasy 0 (FSRQs i BL Lacs). Dodatkowo, praca zawiera analizę przyczyny niezgodności pomiędzy danymi obserwacyjnymi a modelami widm blazarów, zinterpretowanej jako brak uwzględnienia dodatkowego komponentu promieniowania tych obiektów – radiowej emisji dyfuzyjnej.

ABSTRACT

The PhD thesis *Low energy, diffuse blazar emission and the AGN unification scheme* contains a detailed analysis of the blazar SBS B1646+499, which merges the properties of BL Lacs and Flat Spectrum Radio Quasars. It has been made on the basis of available archival data, as well as dedicated observations which have been performed using LOFAR, GMRT and JVL A radio interferometers. This little-known source turned out to possess extended radio emission reaching almost 1 Mpc in length. This kind of such an extended emission of class-0 AGN object has been observed for the first time. It has been proved that low-energy, high-resolution observations with good sensitivity and dynamics could provide the information on the past phases of blazars’ activity, which – in

this case – should be considered in terms of the unification scheme of active galaxies. The jet of SBS B1646+499 has changed the direction of its propagation most probably due to the Lense-Thirring drag mechanism, hence a class-2 AGN became a blazar of mixed properties of both AGN class-0 subtypes (FSRQs and BL Lacs). Additionally, the author explained the model-to-observations deviation for blazars' spectral energy distribution modelling. The additional radiation component of these objects – diffuse radio emission – should be taken into account.

Ogromne wyrazy wdzięczności należą się mojemu **Promotorowi, dr. hab. Marianowi Soidzie** za przekazaną mi wiedzę, wszelką pomoc (także podtrzymywanie na duchu!), poświęcony czas i cierpliwość w poprawianiu kolejnych wersji pracy. **Promotorowi pomocniczemu, dr. Błażewi Nikiel-Wroczyńskiemu** także bardzo dziękuję za poświęcenie mi czasu i dużo cennych uwag. Jestem wdzięczna **dr. hab. Markowi Jamrozemu**, bez którego nigdy nie podjęłabym decyzji o rozpoczęciu studiów doktoranckich i który nauczył mnie radioastronomii. Mnóstwo wiedzy i chęci do pracy dostarczył mi także **dr hab. Łukasz Stawarz**.

Serdecznie dziękuję dr. Volkerowi Heesenowi za ugoszczenie mnie w Niemczech, konsultacje i udostępnienie klastra obliczeniowego (którego właścicielem jest Uniwersytet Hamburski). Wyrazy wdzięczności należą się także dr. Davidowi Rafferty'emu oraz dr. Timowi Shimwellowi za pomoc LOFARową. Dziękuję personelowi obsługującemu interferometrię GMRT, JVLA oraz LOFAR, który umożliwił mi wykonanie obserwacji oraz prof. Jayaramowi Chengalurovi za dostarczenie oprogramowania FLAGCAL. Dane w pracy zostały częściowo przetworzone przez zespół the LOFAR Two-Metre Sky Survey (LoTSS). Zespół ten korzysta z oprogramowania the LOFAR direction independent calibration pipeline (<https://github.com/lofar-astron/prefactor>), które zostało wdrożone przez the LOFAR e-infragroup na Dutch National Grid infrastructure ze wsparciem the SURF Co-operative poprzez granty e-infra 160022 e-infra 160152 (Mechev et al. 2017, PoS(ISGC2017)0

02). Oprogramowanie kalibracji zależnej od kierunku i obrazowania The LoTSS direction dependent calibration and imaging pipeline (<http://github.com/mhardcastle/ddf-pipeline/>) zostało uruchomione na klastrach obliczeniowych w Leiden Observatory i University of Hertfordshire, które są wspierane przez European Research Council Advanced Grant [NEWCLUSTERS-321271] i UK Science and Technology Funding Council [ST/P000096/1]. Niniejsza praca została częściowo wykonana w ramach grantów Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego: K/DSC/004354, K/DSC/003675.

Spis treści

Spis treści	i
1 Wstęp	11
1.1 Temat i cel pracy	11
1.2 Struktura pracy	12
1.3 Od początków radioastronomii do odkrycia galaktyk aktywnych	12
2 Galaktyki aktywne i najnowsze możliwości obserwacyjne	15
2.1 Model unifikacyjny galaktyk aktywnych: blazary .	15
2.2 Rozciągła emisja radiowa blazarów	21
2.3 Nowoczesne radiointerferometry	27
2.3.1 Giant Meterwave Radio Telescope	27
2.3.2 Karl G. Jansky Very Large Array	28
2.3.3 LOw Frequency ARray	29
3 Hybrydowy blazar z dyfuzyjną emisją radiową	31
3.1 Opracowanie danych	31
3.2 Obserwacje obiektu SBS B1646+499	32
3.3 Dane obserwacyjne	33
3.3.1 Analiza w paśmie radiowym	33
3.3.2 Obserwacje optyczne i w podczerwieni . . .	50
3.3.3 Obserwacje w paśmie rentgenowskim i gamma	52
3.4 Niskoenergetyczny komponent widm blazarów . .	52

4 Opis i interpretacja wyników	61
4.1 Rezultaty badań blazara SBS B1646+499	61
4.1.1 Rozkład energii spektralnej	61
4.1.2 Emisja dżetu	66
4.1.3 Struktura rozciągła	69
4.1.4 Indeks spektralny	74
4.2 Wnioski i dyskusja	76
4.2.1 Hybrydowy blazar z burzliwą przeszłością: precesja osi dżetu	76
4.2.2 Niskoenergetyczna, dyfuzyjna emisja blazarów a model unifikacyjny galaktyk aktywnych	86
4.3 Podsumowanie	87
Bibliografia	93
Spis rysunków	102
Spis tabel	104

Rozdział 1

Wstęp

Rozdział ten stanowi wprowadzenie do pracy. Poniżej omówione zostały temat i cel rozprawy, jej struktura wraz z zawartością poszczególnych rozdziałów, a także krótki zarys historyczny obserwacji radioastronomicznych.

1.1 Temat i cel pracy

Tematem pracy jest niskoenergetyczna, dyfuzyjna emisja blazarów i wynikające z niej implikacje dla modelu unifikacyjnego galaktyk aktywnych. Analizie poddano dane obserwacyjne w zakresie radiowym na częstotliwościach od 74 MHz do 43.3 GHz, włączając zarówno te archiwalne, jak i pochodzące z dedykowanych obserwacji przy użyciu interferometrów na fale radiowe: GMRT, LOFAR oraz JVLA.

Badania dotyczą wybranego blazara SBS B1646+499, który ze względu na swoje ciekawe właściwości stanowi doskonały obiekt do analizy przeszłej i obecnej aktywności źródeł tego typu. Ich celem jest prześledzenie historii aktywności jądrowej blazara i określenie pochodzenia jego charakterystycznej morfologii w kontekście ogólnej klasyfikacji galaktyk aktywnych.

Rozprawa powstała na podstawie artykułu: *Megaparsec-scale Radio Structure Associated with a Hybrid Blazar SBS B1646+499: Episodic Jet Activity with Precessing Axis* autorstwa U. Pajdosz-

-Śmierciak, M. Jamrozego, M. Soidy i Ł. Stawarza, opublikowanego w *The Astrophysical Journal* (vol. 868, str. 1, 2018) oraz niepublikowanych dotąd danych obserwacyjnych uzyskanych przez autorkę.

1.2 Struktura pracy

Praca została podzielona na cztery rozdziały. Rozdział pierwszy zawiera wprowadzenie, w tym krótki opis powojennego rozwoju radioastronomii jako dziedziny naukowej, a także wstęp do badań aktywnych galaktyk. W rozdziale drugim przedstawiona została problematyka badawcza, a także podstawy teoretyczne pracy i obecny stan badań naukowych. Następnie, w rozdziale trzecim, omówione zostały obiekty będące celem analizy, szczegóły opracowania obserwacji oraz uzyskane dane interferometryczne. Dodatkowo, rozdział ten zawiera analizę niespójności w modelowaniu widm blazarów na niskich częstotliwościach radiowych. Rozdział czwarty zawiera opis i interpretację rezultatów badań wraz z wnioskami, dyskusją i uwagami na przyszłość. Do pracy dołączono także spis pozycji bibliograficznych, rysunków i tabel.

1.3 Od początków radioastronomii do odkrycia najbardziej egzotycznych obiektów we Wszechświecie

Obecnie, radioastronomia jest jedną z najszybciej rozwijających się dziedzin naukowych, o szerokim zakresie zagadnień: począwszy od elektroniki i sprzętu odbiorczego, skończywszy na analizie najodleglejszych obiektów we Wszechświecie. Jest to dyscyplina stosunkowo młoda i jak wiele nowoczesnych dziedzin naukowych swój największy rozwój zawdzięcza głównie

wynalazkom powstałym na potrzeby walk zbrojnych, w tym przypadku – na frontach II Wojny Światowej. Niemniej jednak, już 8 lat przed rozpoczęciem działań wojennych, Karl Jansky, inżynier pracujący w *Bell Telephone Laboratories*, dokonał odkrycia pierwszego, pozaziemskiego źródła promieniowania radiowego, na częstotliwości 20.5 MHz (długość fali 14.6 m). Stało się to przez przypadek, gdyż Jansky oddelegowany był do analizy zakłóceń transoceanicznego przesyłu sygnału radiowego [52]. Zauważył on, że niezidentyfikowany sygnał cechuje okresowy charakter – zmienność w skali 23 h 56 m, czyli równa dokładnie dobie gwiazdowej. Źródłem tego sygnału okazało się być centrum naszej Galaktyki – *Sagittarius A*. Obecnie, dzięki rozwojowi interferometrii wielkobazowej (ang. *Very Long Baseline Interferometry*, VLBI) wiemy, że źródłem tym były okolice *Sagittarius A**, supermasywnej czarnej dziury w centrum Drogi Mlecznej i według najdokładniejszych obserwacji jej rozmiar to około 1 j.a. na długości fali 3.5 mm [103].

Parę lat później sporządzona została pierwsza mapa Galaktyki – przez zainspirowanego pracą Jansky’ego, Grote’a Rebera [59]. Zapoczątkowało to nową epokę obserwacji w niezbadanym dotąd zakresie widma elektromagnetycznego, gdyż przez ostatnie kilkaset lat to astronomia optyczna była praktycznie jedynym oknem ludzkości na Wszechświat.

Po zakończeniu II Wojny Światowej zaczęto wykorzystywać nowoczesny jak na owe czasy sprzęt elektroniczny, w tym radary, do celów cywilnych i rejestrować pierwsze sygnały z Księżyca oraz planet Układu Słonecznego (przy czym należy wspomnieć, że radiowy sygnał ze Słońca został odebrany jeszcze w okresie walk zbrojnych). Jednak dopiero wraz z rozwojem interferometrii wielkobazowej – za syntezę apertury w 1974 roku, Antony Hewish i Martin Ryle zostali nagrodzeni Nagrodą Nobla – za-

uważano, iż większość obiektów na radiowym niebie pochodzi spoza naszej Galaktyki, a osiągnięte zdolności rozdzielcze poniżej jednej sekundy łuku pozwoliły na zbadanie natury tych źródeł [59]. Zarówno bowiem ich widma, jak i struktura radiowa (w tym mechanizmy i miejsce wytwarzania promieniowania radiowego) nie wskazywały na gwiazdowe pochodzenie. Dodatkowo, analiza linii emisyjnych w ich widmach ujawniła znaczne przesunięcie ku czerwieni. J. L. Greenstein nadał im nazwę *Quasi Stellar Radiosources* (QSRs; kwazi-gwiazdowe radioźródła; w języku polskim – kwazary) [98] [59].

Kwazary okazały się być jednymi z najbardziej egzotycznych obiektów w obserwowanym Wszechświecie. Szereg teorii i hipotez wyjaśniających najważniejsze aspekty astrofizyczne Aktywnych Jąder Galaktyk (ang. *Active Galactic Nuclei*: AGN), których według obecnej klasyfikacji kwazary są podtypem, powstał dzięki temu, iż emitują one promieniowanie praktycznie w całym zakresie widma elektromagnetycznego. Pozwala to zebrać znaczną ilość szerokopasmowych danych. Poszczególne składowe tych źródeł: supermasywna czarna dziura, dysk akrecyjny, korona, gazowo-pyłowy torus, skolimowany dżet oraz galaktyka macierzysta cechują się różnymi mechanizmami promieniowania, a dodatkowo – ich obserwowane właściwości są bardzo zależne od nachylenia obiektu względem obserwatora z Ziemi.

Ze względu na fakt, iż obiekty te nadal nie zostały w pełni poznane, to właśnie aktywne galaktyki są tematem niniejszej pracy, a ich dokładna specyfika została opisana w następnym rozdziale.

Rozdział 2

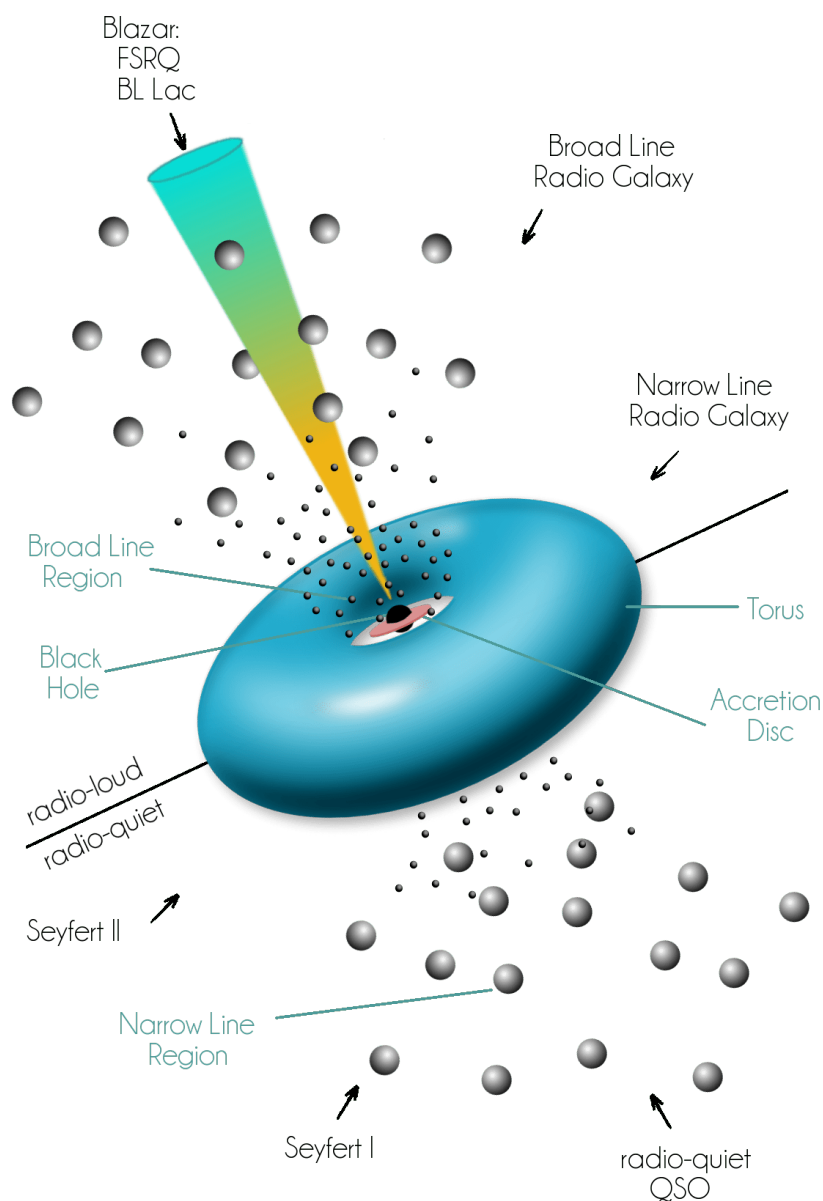
Galaktyki aktywne i najnowsze możliwości obserwacyjne

W poniższym rozdziale przedstawiono blazary w kontekście modelu unifikacyjnego galaktyk aktywnych oraz opisano ich rozciągłą emisję na falach radiowych. W ostatnim podrozdziale zawarte są informacje na temat nowoczesnych metod obserwacji na długich falach radiowych, w tym dokładny opis innowacyjnego interferometru radiowego *LOW Frequency ARray*.

2.1 Model unifikacyjny galaktyk aktywnych: blazary

Model unifikacyjny galaktyk aktywnych przedstawiony w pracy [112] opisuje te źródła jako supermasywne czarne dziury o masach w zakresie $10^6 - 10^{10} M_{\odot}$, otoczone dyskiem akrecyjnym i koroną. Obłoki gazowe poruszające się z dużymi prędkościami (ang. *broad-line region*) mogą, w zależności od nachylenia obiektu względem obserwatora, zostać przysłonięte przez gazowo-pyłowy torus i szerokie linie emisyjne w widmie obiektu nie są wtedy obserwowane. W większej odległości od centrum galaktyki krążą obłoki gazowe posiadające mniejsze prędkości, tworzące region wąskich linii emisyjnych (ang. *narrow-line region*). Czasami można także zaobserwować dżet, a więc skolimowany strumień relatywistycznych cząstek, powstający około 100 promieni Schwarzschilda od centralnej czarnej dziury. Me-

chanizm jego powstawania nie został jeszcze dokładnie poznany.



Rysunek 2.1: Schemat unifikacyjny galaktyk aktywnych (F. Krauß za [112]). Źródła te są podzielone ze względu na kąt widzenia względem obserwatora, a także obecność radiowego dżetu lub jego brak. Na rysunku zaznaczone zostały podstawowe składowe AGNu: czarna dziura, dysk akrecyjny, torus, region szerokich i wąskich linii emisyjnych oraz dżet.

Galaktyki aktywne napędzane są przez energię niesioną z materią akreującą na supermasywne czarne dziury w ich centrach. Materia opadająca na obiekt centralny traci moment pędu w wyniku turbulentnych procesów zachodzących w dysku akrecyjnym, wyzwalając promieniowanie w zakresie ultrafioletu i miękkiego promieniowania rentgenowskiego. Twarde promieniowanie rentgenowskie jest prawdopodobnie produkowane przez elektrony znajdujące się ponad dyskiem – w koronie. Silne, optyczne i ultrafioletowe linie emisyjne powstają w obłokach gazu poruszających się w potencjale grawitacyjnym centralnej czarnej dziury z dużymi prędkościami.

Dżety emitują nietermiczne promieniowanie poprzez procesy synchrotronowy oraz odwrotny efekt Comptona (ang. *Inverse Compton*; IC) i prawdopodobnie procesy hadronowe. Emisja ta zawiera się w przedziale od częstotliwości radiowych aż po promieniowanie gamma. Małoenergetyczne dżety zwalniają już w obszarze galaktyki macierzystej, podczas gdy te posiadające bardzo wysokie energie wypływają do środowiska międzygalaktycznego, formując wielkoskalowe płaty, o rozmiarach sięgających megaparseków. Dysk akrecyjny promieniuje termicznie w zakresie optycznym, ultrafioletowym i miękkim rentgenowskim. Torus natomiast jest emitorem promieniowania podczerwonego, a gorąca korona – fal rentgenowskich [112].

Aktywne Jądra Galaktyk są standardowo dzielone na trzy klasy: 0, 1 i 2. Sama klasyfikacja jest jednak czysto fenomenologiczna, gdyż stworzona została na podstawie właściwości obserwacyjnych tego samego rodzaju obiektu, które są różne w zależności od kąta patrzenia ziemskiego obserwatora, co zostało przedstawione na rys. 2.1. Obserwuje się obiekty radiowo-głośne oraz radiowo-ciche, posiadające widma z szerokimi, bądź wąskimi liniami emisyjnymi, albo wręcz z brakiem jakichkol-

wiek linii widmowych. Radiowy schemat unifikacyjny wyjaśnia pochodzenie obiektów zdominowanych przez jądro, posiadających zatem płaskie widmo oraz tych, w których duża część promieniowania pochodzi z utworzonych płatów o stromym widmie [113].

Jedynie 15–20% obiektów spośród wszystkich galaktyk aktywnych jest uznawanych za radiowo-głośne, gdyż to wewnętrzne pole magnetyczne, gęstość środowiska międzygwiazdowego oraz masa i spin czarnej dziury znacząco wpływają na formowanie się, propagację i energię emitowanych dżetów [88], [113]. Wśród nich znajdują się blazary, obserwowane pod niewielkim kątem ($\sim 0^\circ$) w stosunku do kierunku propagacji dżetów. Ich promieniowanie jest praktycznie w całości zdominowane przez wzmocnioną dopplerowsko, nietermiczną emisję wyzwaną w dżetach. Blazary należą do AGNów klasy 0 i zostały dodatkowo podzielone na dwie podklasy: lacertydy (ang. *BL Lacs*) oraz kwazary z płaskim widmem radiowym (ang. *Flat Spectrum Radio Quasars*; FSRQs). Do AGNów klasy 1 zaliczane są głównie kwazary z szerokimi liniami emisyjnymi i galaktyki *Seyferta* typu I. Klasę 2 aktywnych galaktyk stanowią między innymi radiogalaktyki Fanaroffa-Riley’a typu I i II (FR I, FR II) oraz radiowo-ciche *Seyferty* typu II [112].

Optyczne widma lacertyd w zasadzie nie posiadają szerokich linii emisyjnych (niemniej istnieją wyjątki od tej reguły), podczas gdy widma FSRQs cechuje obecność poszerzonych linii H_α . Dodatkowo, obiekty te są silnymi emiterami promieniowania gamma, ich kontinuum zmienia się w wielu różnych skalach czasowych (od godzin do lat), a strumień wykazuje wysoki stopień polaryzacji [112]. Powszechnie uważa się, że lacertydy stanowią te same obiekty, co małoenergetyczne radiogalaktyki Fanaroffa-Riley’a I, przy czym warunkiem przynależności do

podklasy FR I jest spadek emisji radiowej w kierunku od centrum na zewnątrz źródła. FSRQs to natomiast ta sama podklasa, co bardziej energetyczne źródła FR II, które posiadają silne regiony emisji na krańcach rozciągających się płatów obiektu (tak zwane gorące plamy, ang. *hot spots*) [34] [38] [123].

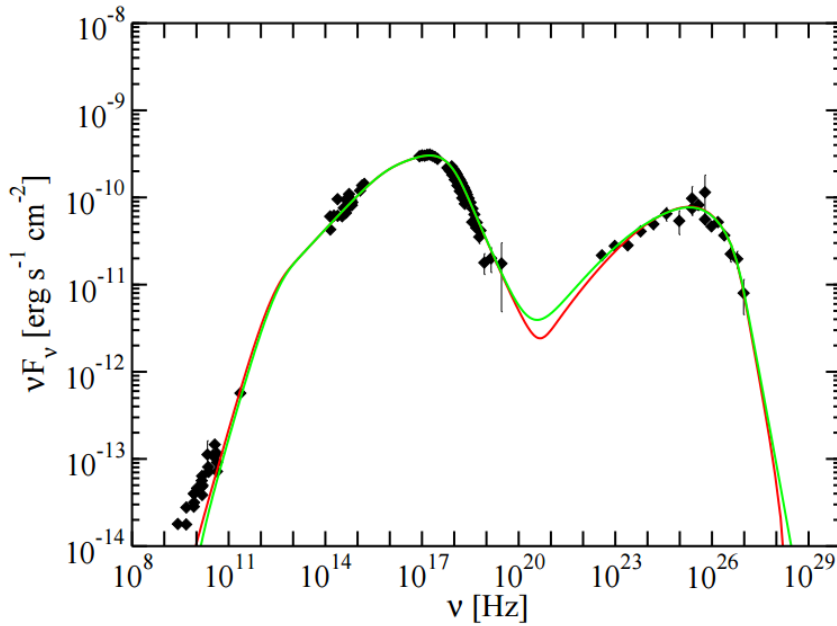
Trzeba jednak zwrócić uwagę na fakt, iż obserwacje radiowe o dużej dynamice wykazują obecność dyfuzyjnych struktur okalających lacertydy, których jasność przewyższa w pewnych przypadkach wartość graniczną dla podziału FR I/FR II, a niektóre z nich cechują się morfologią obiektów charakterystyczną dla źródeł FR II i silną polaryzacją w skali kiloparsekowej [56].

Rozkład energii widmowej lacertyd wykazuje charakterystyczny, bimodalny profil (rys. 2.2). Pierwszy pik widmowy (dla wartości (νS_ν) występuje w przedziale $\sim 10^{12.5} - 10^{18}$ Hz i jest generowany w procesie synchrotronowym, w którym udział biorą relatywistyczne elektrony z dżetu. Drugą, bardziej energetyczną część widma w przedziale od około 10 MeV (10^{21} Hz) do TeV (10^{26} Hz) dla lacertyd oraz od keV (10^{17} Hz) do GeV (10^{23} Hz) dla kwazarów z płaskim widmem radiowym produkują fotony uzyskujące wysokie energie w procesie odwrotnej komptonizacji w modelach leptonowych (np. [58]). W scenariuszu hadronowym natomiast, to relatywistyczne protony są odpowiedzialne za drugą część bimodalnego rozkładu, rozciągającą się w przypadku niektórych obiektów aż do ultrawysokich energii (następuje synchrotronowa emisja protonów lub emisja produktów wtórnych reakcji proton–proton lub proton–foton).

Dodatkowo, w modelowaniu widm blazarów wprowadza się procesy *Synchrotron Self Compton* (SSC) lub *External Compton* (EC), a różnica pomiędzy nimi polega na pochodzeniu fotonów rozpraszanych komptonowsko. Z kolei modele wielo- i jednostrefowe uwzględniają, bądź nie, dodatkowe pola promienio-

wania z różnych części dżetu [25] [37] [18].

Lacertydy, dla których maksimum emisji synchrotronowej przypada powyżej 10^{15} Hz stanowią ogromny odsetek pozagalaktycznych źródeł emitujących promieniowanie w zakresie TeV (np. [75]) i są klasyfikowane jako *High Frequency Peaked BL Lacs* (HBLs). W przeciwieństwie do nich, wyróżnia się także *Low Frequency Peaked BL Lacs* (LBLs), dla których pik w emisji synchrotronowej przypada poniżej 10^{15} Hz oraz typ pośredni: *Intermediate Frequency Peaked BL Lacs* (IBLs). To właśnie typ HBL jest utożsamiany z radiogalaktykami FR I [55].



Rysunek 2.2: Widmo blazara typu HBL Mrk 421 uzyskane na podstawie wieloczęstotliwościowych kampanii obserwacyjnych. Zielona i czerwona krzywa przedstawiają dopasowane modele jednostrefowe z czasami zmienności odpowiednio 1 godzina i 1 dzień (rys. zaczerpnięty z pracy [25]).

2.2 Rozciągła emisja radiowa blazarów

Chociaż, ze względu na niewielki kąt nachylenia osi dżetu względem obserwatora z Ziemi i duże odległości kosmologiczne blazary uznawane są za źródła punktowe, istnieje pewna grupa obiektów tego typu posiadająca rozciągłą emisję radiową. Najczęściej ma ona postać otaczającego jądro halo, rozciągającego się w skali od sekund aż do kilku minut łuku na niebie.

Fakt istnienia takich struktur wydaje się być konsystentny z unifikacją blazarów z obiektami typu FR I i FR II widzianymi pod niewielkim kątem, jednakże przyczyna powstawania radiowego halo wokół blazarów nie została jeszcze w pełni wyjaśniona. Nie jest też znany powód, dla którego halo nie występuje wokół wszystkich blazarów oraz dlaczego w niektórych przypadkach jego morfologia jest bardzo specyficzna, zdecydowanie nieprzypominająca płatu widzianego od czoła.

Już w roku 1985 Antonucci i Ulvestad odkryli rozciągłe struktury dla 54 blazarów przy pomocy obserwacji interferometrycznych *Very Large Array* (VLA) na długości fali 20 cm [3]. W latach 1986–1991, Laurent-Muehleisen i inni zbadali strukturę radiową 15 la-certyd z przeglądu satelity HEAO-1 (*HEAO-1 Large Area Sky Survey* [66]) na częstotliwości 1.5 oraz 5 GHz [62]. Spośród nich, rozciągła emisja została wykazana dla 12 obiektów (80% zbadanych blazarów), w tym dla 4 po raz pierwszy. Ich analizy pokazały, że obiekty typu BL Lac promieniujące w dużej mierze w zakresie radiowym (ang. *Radio-selected BL Lacs*; RBLs) z próbki *1 Jansky Sample* [109] posiadają 5–10 razy większą moc w tym paśmie, niż typowe źródła typu FR I i la-certydy świecące głównie w zakresie promieniowania rentgenowskiego (*X-ray selected BL Lacs*; *XBLs*) z katalogów 3CR i B2 [35] [60] [111]. Dla dwóch ostatnich jasność radiowa jest porównywalna.

Następnie, w roku 1999, także za pomocą VLA, Cassaro i in. ni zaobserwowali 28 źródeł typu BL Lac na częstotliwościach 1.36, 1.66 i 4.85 GHz [15]. Badania te zostały uzupełnione o dane z radiointerferometru *Westerbork Synthesis Radio Telescope* (WSRT) pracującego na częstotliwości 1.4 GHz. Tak jak w powyższych przypadkach, potwierdzono rozciągłą emisję radiową dla 18 obiektów (64% zaobserwowanych), w kilku przypadkach była ona bardziej rozległa, niż zarejestrowana wcześniej, a także dorównująca jasnością źródłom typu FR II. Rys. 2.4 i 2.5 przedstawiają 3 blazary: 3C 371, Mrk 421 i Mrk 180 (kolejno lewy, środkowy i prawy panel), będące przykładami obiektów wykazujących taką emisję. Rys. 2.4 zawiera obserwacje o niskiej zdolności rozdzielczej z przeglądów radiowych *National Radio Astronomy Observatory Very Large Array Sky Survey* (NVSS) i *Westerbork Northern Sky Survey* (WENSS) na częstotliwościach 1400 i 327 MHz. Rys. 2.5 przedstawia te same źródła, jednak zobrazowane z wykorzystaniem obserwacji VLA o wyższej rozdzielczości na częstotliwościach 1360, 1500, 1485 i 4985 MHz, gdzie widać szczegóły emisji rozciągłej. Na rysunku 2.3 widać strukturę znajdującą się wewnątrz rozległego halo obiektu 3C 371: dwa płaty wraz z dżetem i gorącą plamą.

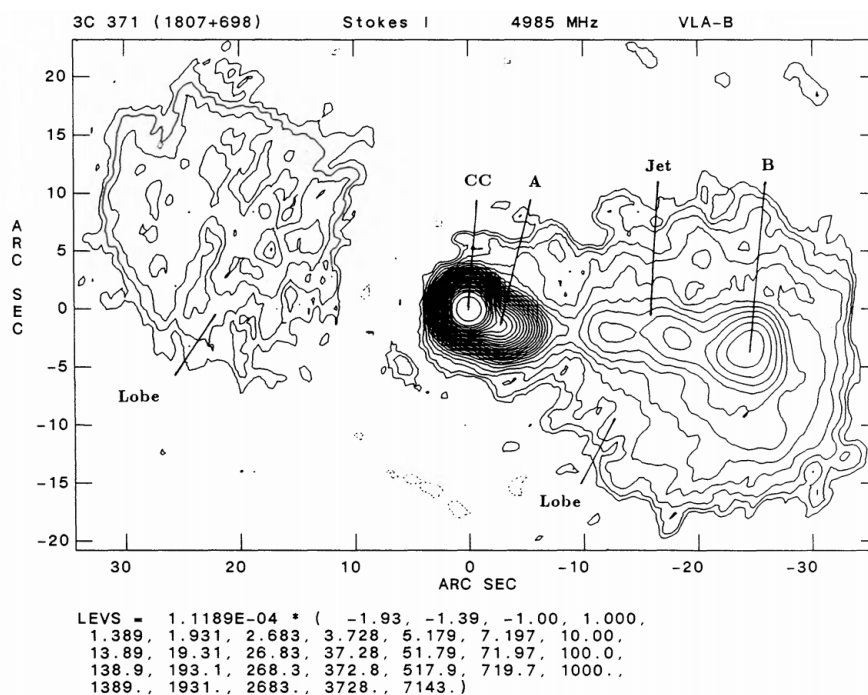
Jednym z ciekawszych blazarów, zarówno pod względem morfologii, jak i nie do końca poznanego mechanizmu promieniowania jest *AP Librae*. Jest to źródło typu LBL, które wykazuje szczególną aktywność w paśmie optycznym. Co ciekawe, synchrotronowa składowa emisyjna w szerokopasmowym widmie obiektu jest wąska (w przedziale częstotliwościowym) w porównaniu z szeroką częścią widma pochodzącego z IC, która to rozciąga się od promieniowania rentgenowskiego aż do wartości TeV [1]. Dodatkowo, obserwacje radiowe *AP Librae* na długości fali 21 cm wykazały obecność rozciągłej, dyfuzyjnej emisji

okalającej jednostronny dżet (np. [22] [29] [79] [15]), co stanowi przypadek analogiczny do analizowanego w pracy blazara SBS B1646+499.

Kolejne źródło warte uwagi to blazar 3C 371, który został utożsamiony z galaktyką o przesunięciu ku czerwieni wynoszącym 0.05 [101], znajdującą się w gwiazdozbiorze Smoka (rys. 2.3, lewe panele rys. 2.4 i 2.5). Supermasywna czarna dziura w jej centrum ma masę $10^9 M_{\odot}$ [33]. Widmo tego obiektu wykazuje linie emisyjne o charakterze podobnym do tych, pojawiających się w galaktykach eliptycznych, jednakże posiada także zmienne, nietermiczne kontinuum. Blazar ten został po raz pierwszy sklasyfikowany jako obiekt typu BL Lac przez Millera w 1975 roku [78]. Obserwacje za pomocą VLBI ujawniły dżet rozciągający się w skali milisekund łuku na zachód od struktury centralnej [41].

Wrobel i Lind na podstawie obserwacji VLA opisali dwa, posiadające małą jasność powierzchniową płaty źródła 3C 371 (rys. 2.3) [120], znajdujące się w rozciągłym halo [15], osiągającym 4 minuty łuku (co odpowiada ~ 240 kpc) (rys. 2.5 lewy panel). Słaby komponent ulokowany w zachodnim płacie posiada morfologię i rozmiar pozwalający sklasyfikować go jako gorącą plamę, charakterystyczną dla obiektów typu FR II.

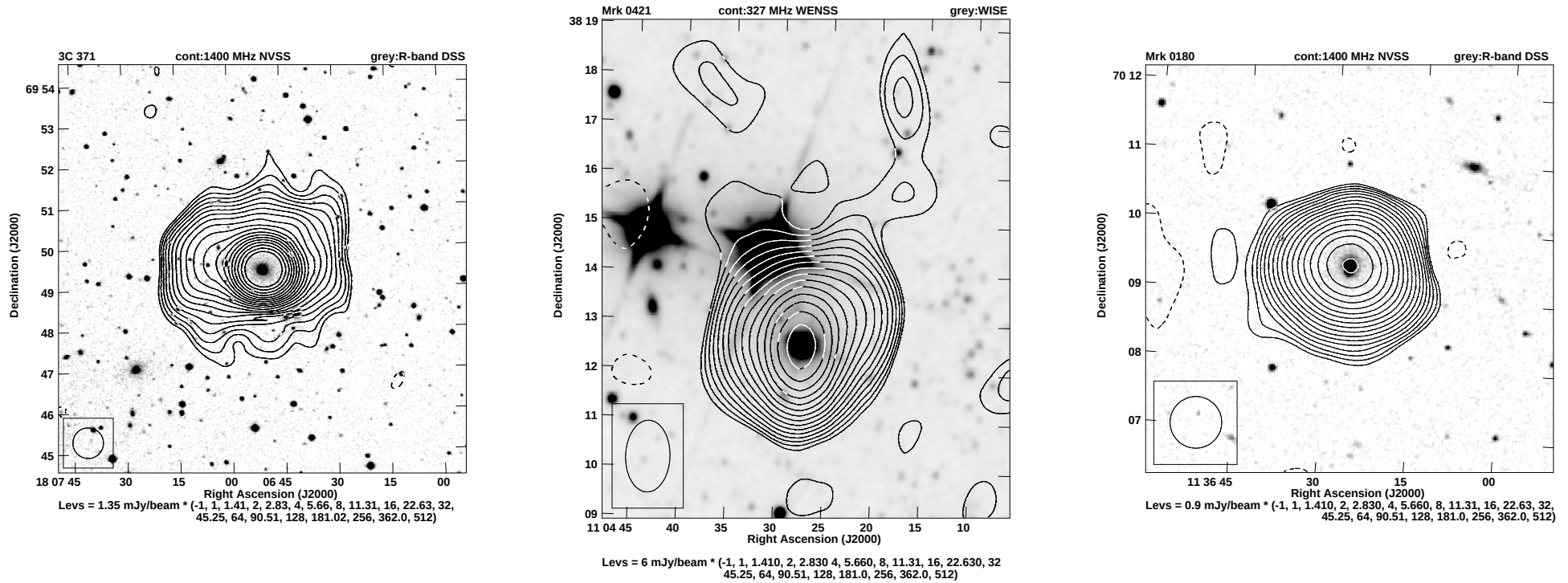
Emisję rozciągłą wykazuje także Mrk 421 – jeden z najbardziej znanych blazarów, identyfikowany z jasną, eliptyczną galaktyką (środkowe panele rys. 2.4 i 2.5). Obiekt ten znajduje się w konstelacji Wielkiej Niedźwiedzicy, a na częstotliwościach radiowych posiada silne, dyfuzyjne halo rozciągające się na ponad 3 minuty łuku ($1' = 36$ kpc dla przesunięcia blazara ku czerwieni równego 0.031 [23]). Odkryty jako jeden z pierwszych emiterów w zakresie bardzo wysokich energii i zaliczany do grupy HBL, wykazuje zmienność między innymi w zakresie optycz-



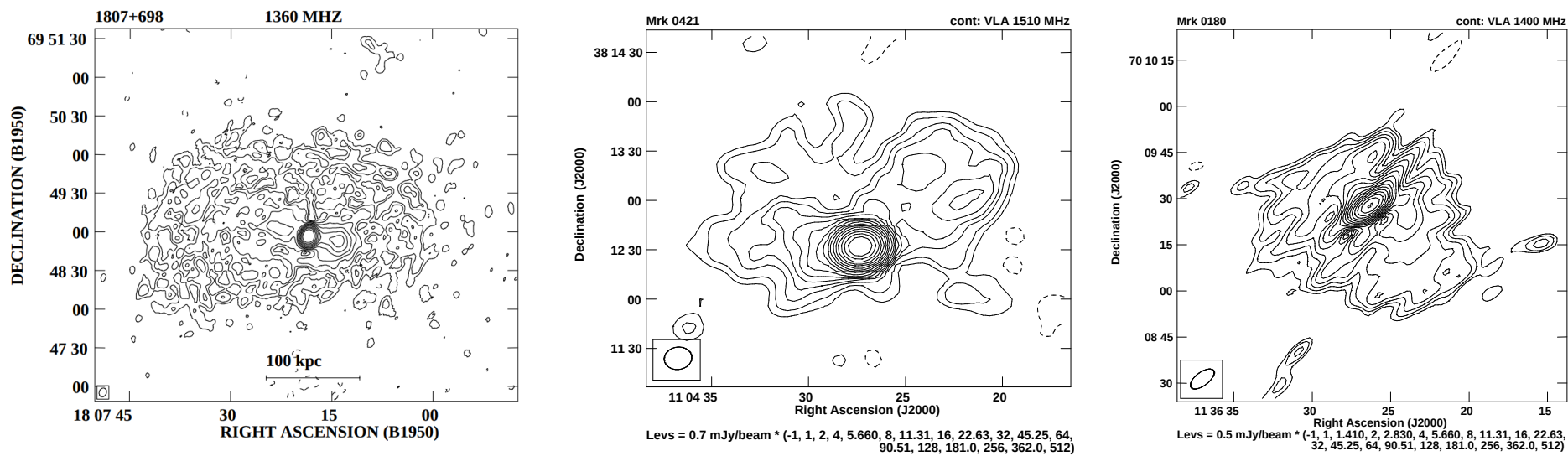
Rysunek 2.3: Konturowa mapa blazara 3C 371 wykonana na podstawie obserwacji VLA w konfiguracji B na częstotliwości 4985 MHz. Ze zwartego radiowego centrum obiektu wypływa dżet, widoczne są także dwa płaty oraz gorąca plama (mapa pochodzi z pracy [120], zdolność rozdzielcza wynosi $2''.1 \times 2''.1$).

nym w skali od kilku godzin/dni do 23 lat ([11] i ref. w tej pracy) i w zakresie promieniowania gamma.

Powyższe obiekty stanowią przykłady szczególnej podgrupy blazarów, dla których rozciągnięta emisja radiowa rzędu sekund do minut łuku wciąż nie została wyjaśniona. Ze względu na brak w literaturze dokładnego opisu i badań nad pochodzeniem takich struktur, każdy nowo odkryty obiekt tego typu warto poddać szczegółowej analizie, z włączeniem obserwacji na nowoczesnych interferometrach radiowych na fale długie.



Rysunek 2.4: Konturowe mapy blazarów 3C 371 (*lewy panel*), Mrk 421 (*środkowy panel*) oraz Mrk 180 (*prawy panel*) wykonane na podstawie obserwacji NVSS i WENSS. Mapy w pasmach podczerwonym i optycznym z przeglądów WISE oraz DSS zostały wykorzystane jako tło. Każde z tych źródeł cechuje rozciągła struktura radiowa, ponieważ jednak rozdzielczość kątowna tych map wynosi odpowiednio $45'' \times 45''$, $110''.64 \times 54''$, $45'' \times 45''$, nie zostały uwidocznione jej szczegóły.



Rysunek 2.5: Konturowe mapy obiektów 3C 371 (*lewy panel*), Mrk 421 (*środkowy panel*) oraz Mrk 180 (*prawy panel*) wykonane na podstawie obserwacji VLA na częstotliwościach kolejno: 1360 w konfiguracji A+B+C (wiązka wynosi $7'' \times 5''.5$), 1500 w konfiguracji C (wiązka wynosi $16''.87 \times 13''.58$) i 1400 MHz w konfiguracji B (wiązka wynosi $9''.07 \times 4''.31$). Wysoka zdolność rozdzielcza pozwala dojrzyć szczegóły struktury emisji rozciągłej okalającej te blazary. Mapa z *panelu lewego* pochodzi z pracy [15].

2.3 Nowoczesne radiointerferometry

Ponieważ w wielu przypadkach dyfuzyjna emisja radiowa około blazarów jest słabsza, niż kilkadziesiąt mJy (na podstawie badań własnych), obserwacje takich struktur są możliwe wyłącznie za pomocą sprzętu o dużej czułości i wysokiej dynamice rejestrowanego sygnału. Ponadto, aby móc szczegółowo zobrazować tę emisję, wskazane jest osiągnięcie wysokiej zdolności rozdzielczej przy obserwacjach na długich falach radiowych. Takie wyniki mogą zostać uzyskane jedynie przy pomocy interferometrii radiowej, z wykorzystaniem najlepszych dostępnych teleskopów. Z tego względu, w pracy wykorzystane zostały wyniki dedykowanych obserwacji *LOw Frequency Array* (LOFAR), *Giant Meterwave Radio Telescope* (GMRT) oraz *Karl G. Jansky Very Large Array* (JVLA).

2.3.1 Giant Meterwave Radio Telescope

GMRT jest interferometrem radiowym zlokalizowanym niedaleko Pune, w zachodniej części półwyspu indyjskiego i należy do *National Centre for Radio Astrophysics* (które z kolei jest jednostką indyjskiego *Tata Institute of Fundamental Research*). Składa się z trzydziestu w pełni sterowalnych anten, każda o średnicy 45 metrów. Jak wskazuje sama nazwa radioteleskopu, przystosowany jest do obserwacji na falach metrowych, a dokładny zakres rejestrowanego sygnału wynosi od 50 do 1500 MHz (6–0.2 m). Ten konkretny przedział częstotliwości został wybrany nie tylko ze względu na interesujące projektantów instrumentu zagadnienia badawcze, ale także poprzez fakt, iż dla tej części widma elektromagnetycznego, działalność ludzka w Indiach generuje jedynie nieznaczne zakłócenia. Powierzchnia kolektywna GMRT jest w przybliżeniu trzy razy większa, niż w przypadku JVLA, co z kolei – razem z szero-

kim pasmem przenoszenia (do 32 MHz) – wpływa na wysoką czułość radiointerferometru. Najlepsze, możliwe do osiągnięcia zdolności rozdzielcze GMRT są rzędu kilku sekund łuku, a najdłuższa baza wynosi 25 km ^{*}.

Niedawno radiointerferometr ten przeszedł modernizację, a użytkownicy uGMRT mogą korzystać z szerszego pasma przenoszenia (do 400 MHz; przy podobnym zakresie obserwowanych częstotliwości), większej dynamiki oraz osiągać do trzech razy wyższą czułość na wynikowych mapach [43].

2.3.2 Karl G. Jansky Very Large Array

Wspomniany w podrozdziale 2.2 VLA, położony w stanie Nowy Meksyk, w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej, składa się z dwudziestu siedmiu anten o średnicy 25 m i podobnie, jak w przypadku radiointerferometru indyjskiego – ułożone są one na kształt litery Y. W tym przypadku, anteny mają jednak możliwość zmiany położenia – poruszają się po specjalnie do tego przystosowanych szynach, zmieniając tym samym konfigurację od najszerszej – A – do najwęższej – D. Obserwowane częstotliwości zawierają się w zakresie 74 MHz–50 GHz, a zdolności rozdzielcze osiąmane podczas obserwacji tym sprzętem sięgają setnych części sekundy łuku dla najwyższych częstotliwości i najszerszych konfiguracji.

Ponieważ instrument ten został wybudowany w latach siedemdziesiątych XX wieku przeszedł niedawno modernizację, a w efekcie JVLA zyskał między innymi lepszą czułość, możliwość rejestracji szerszego przedziału częstotliwości i imię Karla Jansky’ego. W planach jest także dołożenie kilku dodatkowych anten [†].

^{*}<http://www.gmrt.ncra.tifr.res.in/>

[†]<https://public.nrao.edu/telescopes/vla/>

2.3.3 LOw Frequency ARray

LOFAR jest radiointerferometrem, który w swojej budowie i sposobie zapisu danych zdecydowanie różni się od uprzednio opisanych radiointerferometrów radiowych, z tego względu na jego opis poświęcono trochę więcej miejsca.

Zasadnicze różnice można zauważyć już gołym okiem – konstrukcja LOFARa jest bowiem całkowicie nieruchoma. Składa się on z 24 stacji centralnych, tzw. *core stations* (CS), 14 bardziej oddalonych stacji, nadal jednak znajdujących się na terenie Holandii (*remote stations*; RS) oraz 13 stacji międzynarodowych (*international stations*; IS); najnowsza z nich powstała niedawno w Irlandii. Polska posiada trzy stacje LOFARa: w Bałdach, Borówcu oraz Łazach. Każda z rozmieszczonych w europejskich krajach stacji tego radioteleskopu składa się z dwóch pól, typowo zawierających po 96 anten typu *Low Band Antennas* (LBA) i *High Band Antennas* (HBA). LBA obserwują północne niebo w zakresie 10–90 MHz i każda z tych anten składa się z dwóch dipoli, wzmacniacza niskoszumowego oraz siatki ekranującej rozmieszczonej bezpośrednio na ziemi, natomiast budowa HBA operujących w zakresie 110–250 MHz jest nieco bardziej złożona, aczkolwiek wciąż niezwykle pomysłowa w swej prostocie. Każde pole HBA zawiera tak zwane *kostki*, podzielone na mniejsze fragmenty, w których rozmieszczono elementy elektroniczne, w tym między innymi wzmacniacze oraz sumatory sygnału, a parzyste dipole do obserwacji polaryzacji krzyżowej przyczepione zostały do styropianowej obudowy taśmą klejącą.

Innowacyjność tego sprzętu opiera się na wprowadzeniu sterowanej komputerowo wiązki radioteleskopu, przy pozostawieniu nieruchomego sprzętu obserwacyjnego. Pozwala to rozbudowywać radiointerferometr przy względnie niewielkich kosztach

oraz uzyskiwać niesamowite rezultaty obserwacyjne, w tym –
–uwzględniając bardzo duże pole widzenia teleskopu i możliwość tworzenia wielu wiązek równocześnie, a także efektywnego przełączania ich pomiędzy obiektami – wykonywać przeglądy całego nieba w relatywnie krótkim czasie.

Obróbka danych spływających z LOFARa odbywa się na superkomputerach, między innymi *Blue Gene/L* w holenderskim Groningen, a sam instrument zbudowany został jako prekursor *Square Kilometer Array* [‡] – będącego w trakcie budowy największego radioteleskopu świata zlokalizowanego w Australii i Afryce, którego powierzchnia efektywna ma wynosić aż kilometr kwadratowy (szczegółowy opis LOFARa został zawarty m. in. w pracach: [30] [31] [24] [114]).

[‡]<https://www.skatelescope.org/>

Rozdział 3

Hybrydowy blazar z dyfuzyjną emisją radiową

Rozdział trzeci zawiera opis obiektu SBS B1646+499, analizę wszystkich dostępnych dla tego obiektu danych obserwacyjnych oraz ich opracowanie. Osobny podrozdział poświęcony został problematyce modelowania widm blazarów z uwzględnieniem przyczynku od emisji dyfuzyjnej.

3.1 Opracowanie danych

Niniejsza praca opiera się na analizie dedykowanych danych obserwacyjnych dla blazara SBS B1646+499. Mapy w paśmie radiowym zostały także uzupełnione danymi archiwalnymi z innych przedziałów widma elektromagnetycznego. Mając na uwadze, że dyfuzyjna emisja radiowa naokoło blazarów może być nawet 1000 razy słabsza w porównaniu do jasnego centrum tych obiektów (na podstawie badań własnych) oraz, iż wymagane jest przeprowadzenie obserwacji na długich falach radiowych (ze względu na domniemany, stromy charakter radiowego widma takich struktur – na podstawie badań własnych), złożone zostały 4 wnioski o czas obserwacyjny na interferometri GMRT (dwa wnioski), LOFAR oraz JVLA.

Otrzymane dane zostały następnie zredukowane, skalibrowane i zobrazowane w sposób odpowiedni dla każdego z tych in-

strumentów, z uwzględnieniem dostępnych metod poprawy ich jakości. Praca zawiera zatem analizę otrzymanych map radiowych, uzupełnioną o dane archiwalne. Na ich podstawie, dokonano obliczeń koniecznych do zrealizowania tematu rozprawy.

W rozprawie, założony został model kosmologiczny Λ CDM, $H_0 = 69.6 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $\Omega_M = 0.286$ oraz $\Omega_\Lambda = 0.714$ [10], tak więc jedna sekunda łuku odpowiada 0.94 kpc dla obserwacji obiektu SBS B1646+499.

3.2 Obserwacje obiektu SBS B1646+499

Blazara SBS B1646+499 można uznać za przedstawiciela hybrydowej klasy tych źródeł, posiadających rozciągłą emisję radiową; zarówno pochodzenie specyficznej morfologii obiektu, jak i dokładny mechanizm promieniowania nie zostały jeszcze poznane i opisane. Źródła tego typu stanowią wyzwanie dla uznawanych od wielu lat schematów klasyfikacji i unifikacyjnego modelu galaktyk aktywnych.

Obiekt SBS B1646+499 ma współrzędne R.A. $16^{\text{h}}47^{\text{m}}34.9^{\text{s}}$, Dec $+49^{\circ}50'01''$ (J2000); jego przesunięcie ku czerwieni równe 0.0475 ([32]; w literaturze można także znaleźć pomiar wynoszący 0.0450 ± 0.002 [73]) odpowiada odległości jasnościowej około 212 Mpc. Źródło to zostało sklasyfikowane jako kwazar z płaskim widmem radiowym [44], a analiza danych w rozdzielczości rzędu sekund łuku ujawnia, iż składa się on z radiowego jądra oraz jednostronnego dżetu. Z kolei dla większych odległości od centrum obiektu można zauważyć jednostronny dżet o krzywoliniowej strukturze. Polaryzacja aktywnego jądra obiektu jest stosunkowo niska (0.07%), natomiast najjaśniejsza część nuklearnego dżetu widoczna na obserwacjach *Very Long Baseline Array* (VLBA) wykazuje 13% poziom polaryzacji [13], przy czym, w pracy [45] wykazano, że sięga on nawet 27%.

Obserwowane widmo blazara jest złożeniem trzech składowych: spolaryzowanego nietermicznego kontinuum, emisji z regionu szerokich linii oraz emisji gwiazdowej z galaktyki macierzystej [50]. Zmienny, spolaryzowany strumień optyczny pozwolił sklasyfikować blazara jako lacertydę [73], z drugiej zaś strony – poszerzona dopplerowsko linia emisyjna H_α jest charakterystyczna głównie dla FSRQs ($\text{FWHM}^* \geq 1000 \text{ km s}^{-1}$ [14]). Trzeba jednak mieć na uwadze, że – jak zostało opisane w pracy [115] – niektóre lacertydy także wykazują obecność szerokich linii emisyjnych H_α oraz H_β . Ponieważ niska jasność radiowa na częstotliwości 5 GHz wyklucza obiekt z grupy FSRQs, SBS B1646+499 jest uznawany za hybrydę dwóch powyższych podklas blazarów.

3.3 Dane obserwacyjne

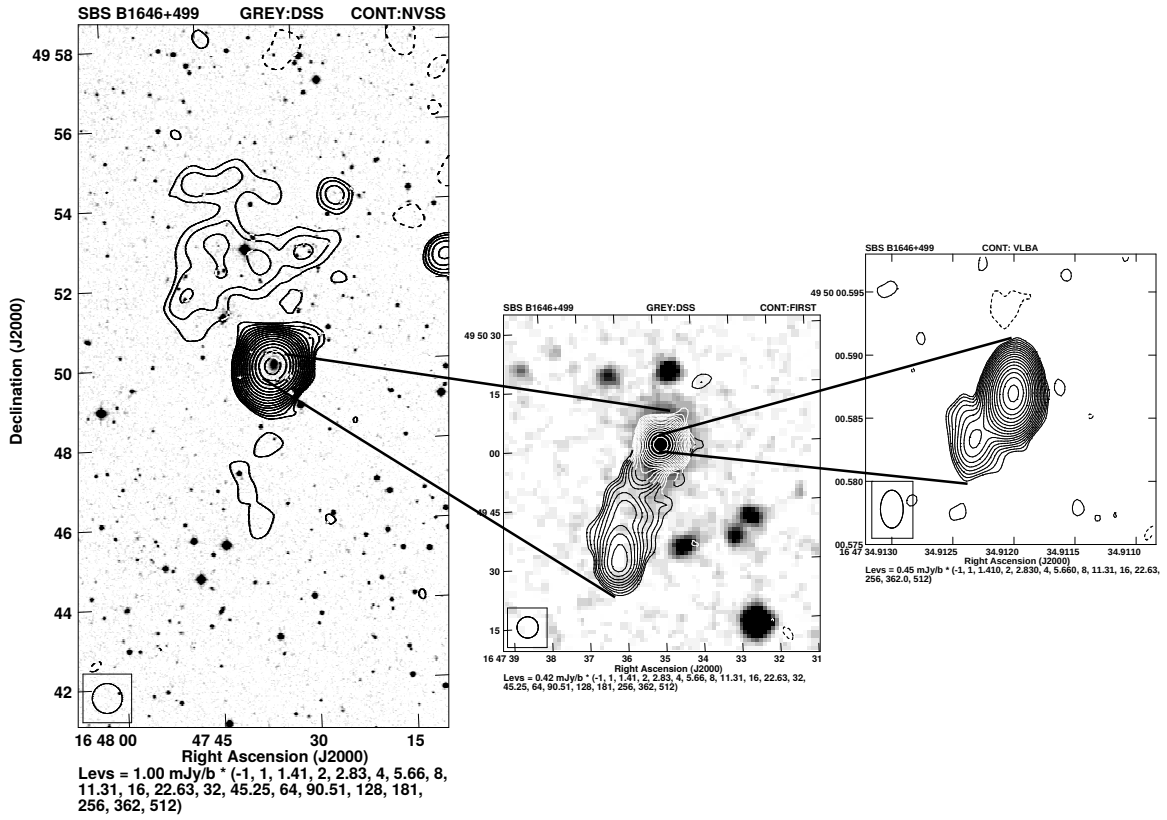
3.3.1 Analiza w paśmie radiowym

Obserwacje archiwalne

Do analizy promieniowania radiowego tego źródła wykorzystano dane archiwalne opisane w tabeli 3.1. Kolumny 1, 2 i 3 zawierają kolejno: nazwę wykorzystanego katalogu/ teleskopu, obserwowaną częstotliwość i odpowiednią referencję.

Analiza mapy obiektu z przeglądu NVSS, ujawniła istnienie rozciągłej struktury na północ od SBS B1646+499 ze zintegrowaną gęstością strumienia wynoszącą $30 \pm 2 \text{ mJy}$, bez wyraźnego odpowiednika zarówno w podczerwieni, w paśmie optycznym, jak i w rentgenowskim (rys. 3.1). Rozmiar halo radiowego wynosi w przybliżeniu 130 kpc, a indeks spektralny (α) pomiędzy obserwacjami WENSS 326 MHz a NVSS 1400 MHz wskazuje na strome widmo i zawiera się w przedziale $-1 \div -1.5$ (w całej pracy została przyjęta konwencja $S_\nu \sim \nu^\alpha$, gdzie S_ν jest

*szerokość w połowie wysokości, ang. *Full Width at Half Maximum*



Rysunek 3.1: *Lewy i środkowy panel* przedstawiają superpozycję map obiektu SBS B1646+499 w radiowym paśmie L i map optycznych z przeglądu DSS w filtrze R. *Lewy panel* odpowiada mapie z przeglądu VLA NVSS w konfiguracji D (rozmiar wiązki wynosi $45'' \times 45''$) i ukazuje jasne, radiowe centrum oraz słabą emisję rozciągającą się na północ od blazara. *Panel środkowy* zawiera dane z przeglądu VLA FIRST w konfiguracji B (rozmiar wiązki wynosi $5''.4 \times 5''.4$) ukazujące jądro i jednostronny, kiloparsekowy dżet. *Prawy panel* przedstawia mapę VLBA wykonaną na częstotliwości 5 GHz obrazującą jądrowe centrum obiektu. W tym przypadku rozmiar wiązki wynosi 3×1.8 milisekundy łuku. Kontury określają promieniowanie od poziomu 3σ i zostały przeskalowane przez czynnik $\sqrt{2}^n$ (gdzie $n=0,1,2,3,\dots$) i dotyczy to wszystkich map zamieszczonych w pracy (chyba, że zaznaczono inaczej). Kontur zaznaczony linią przerywaną obrazuje wartość -3σ i dotyczy to wszystkich map zamieszczonych w pracy.

gęstością strumienia na danej częstotliwości ν). Na podstawie danych NVSS zawierających parametry Stokesa IQU można także stwierdzić, że widoczna na rysunku 3.1 struktura rozcią-

Tabela 3.1: Dane archiwalne wykorzystane do analizy radiowego promieniowania blazara SBS B1646+499.

Nazwa katalogu/ teleskopu	Częstotliwość MHz	Źródło
(1)	(2)	(3)
VLA Low-Frequency Sky Survey VLSSr	74	[20]
The GMRT 150 MHz All-Sky Radio Survey: First Alternative Data Release TGSS ADR1	150	[49]
Westerbork Northern Sky Survey WENSS	327	[94]
National Radio Astronomy Observatory Very Large Array NRAO VLA	1360–44300 [†]	http://archive.nrao.edu/nvas/
National Radio Astronomy Observatory Very Large Array Sky Survey NVSS	1400	[21]
Faint Images of the Radio Sky at Twenty-centimeters FIRST	1400	[8]
Parkes-MIT-NRAO radio continuum surveys PMN	4850	[42]
Very Long Baseline Array VLBA	5 GHz 8 GHz	[45] [67], [68]
European Very-long-baseline Interferometry Network EVN	1.6 GHz	[12], [13]

[†] różne projekty obserwacyjne

gła nie wykazuje polaryzacji.

Dodatkowo, dostępne są pomiary strumienia blazara na częstotliwości 15 GHz wykonane w *Owens Valley Radio Observatory* (OVRO; [95]). Wykazują one zmienność radiowego promieniowania SBS B1646+499 w zakresie 450 – 100 mJy, ze średnim strumieniem wynoszącym 215 ± 16 mJy.

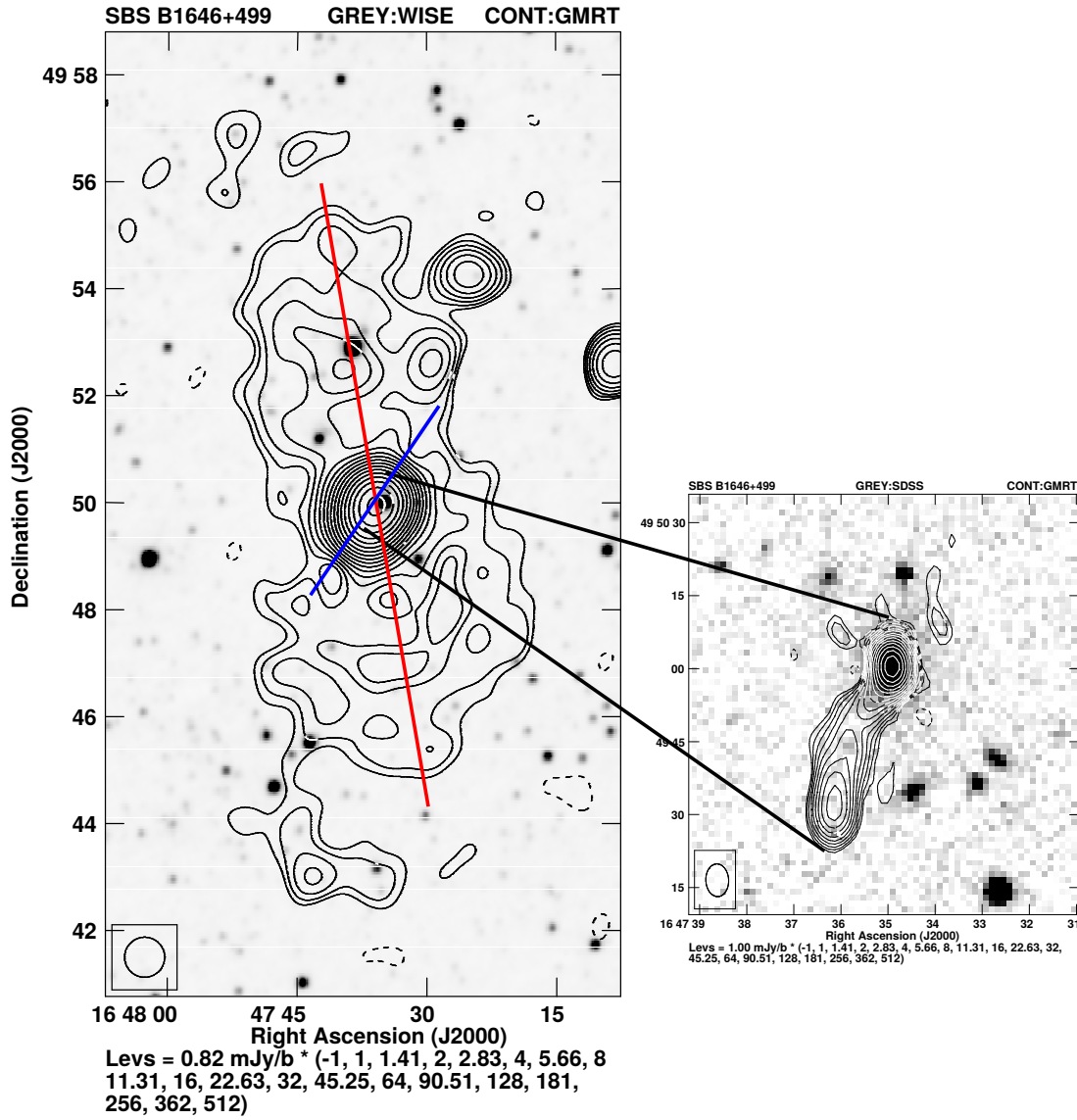
Dedykowane obserwacje radiowe – GMRT

Pierwsze obserwacje GMRT dla obiektu SBS B1646+499 zostały przeprowadzone w czerwcu 2015 roku, na częstotliwości 610 MHz (szerokość pasma 32 MHz), z wykorzystaniem źródeł 3C 286 oraz 3C 48 jako kalibratorów amplitudy oraz J1459+716 i J1638+625 jako kalibratorów fazy. Sygnał ze źródła był rejestrowany przez 8 godzin (wliczając w to kalibrację), a otrzymane dane zostały poddane automatycznemu procesowi flagowania przy użyciu pakietu FLAGCAL [91] [17].

Flagowanie danych polega na automatycznym, bądź ręcznym oznaczeniu wszelkich zakłóceń (ang. *Radio Frequency Interference*, RFI), które mogłyby wpłynąć na rezultat końcowy. Wyklucza się między innymi punkty pomiarowe pochodzące z niewłaściwie działających podczas obserwacji anten, czy poszczególne, silnie zaszumione kanały, zazwyczaj także pierwsze kilka minut zebranych danych (do momentu aż system odbiorczy ulegnie stabilizacji). Procedura ta obejmuje nadanie tym danym odpowiednich flag, tak aby program nie brał ich pod uwagę przy późniejszej analizie, dane te nie są jednak usuwane na stałe. Co ważne – pierwsze, podstawowe flagowanie wykonuje się na danych przed ich uśrednieniem, a procedurę tą zazwyczaj powtarza się aż do osiągnięcia pożądanego rezultatu.

Następnie przeprowadzono standardową redukcję i kalibrację wykorzystując pakiet *NRAO Astronomical Image Processing System* (AIPS[†]). W celu poprawienia jakości otrzymanych wyników, wykonano samo-kalibrację. Średni poziom szumu na otrzymanej mapie wynosi 0.2 mJy/wiązkę, zaś otrzymana wiązka to $6''.72 \times 4''.69$. Dodatkowo, aby osiągnąć czułość konieczną do detekcji słabej struktury dyfuzyjnej i porównać mapę z obserwacjami NVSS, dane (u, v) poddano procedurze *taperowa-*

[†]<http://www/aips.nrao.edu>



Rysunek 3.2: Mapy blazara SBS B1646+499 uzyskane z obserwacji GMRT na częstotliwości 610 MHz. *Lewy panel* przedstawia całą strukturę obiektu wraz z rozciągłymi płatami nałożoną na pole WISE W1. Oryginalnie otrzymana wiązka została rozmyta do wartości $45'' \times 45''$. *Prawy panel* prezentuje wewnętrzną część blazara, a radiowe kontury zostały nałożone na mapę pola z przeglądu SDSSr. Są to te same obserwacje, jak w przypadku panelu lewego, jednak przy obrazowaniu wykorzystano dane z całej płaszczyzny (u,v) , włączając zarówno krótkie, jak i długie bazy interferometru. Rozmiar wiązki wynosi $6''.72 \times 4''.69$. Czerwona i niebieska linia przedstawiają kolejno oś symetrii płatów oraz kąt pozycyjny jądrowego dżetu obiektu.

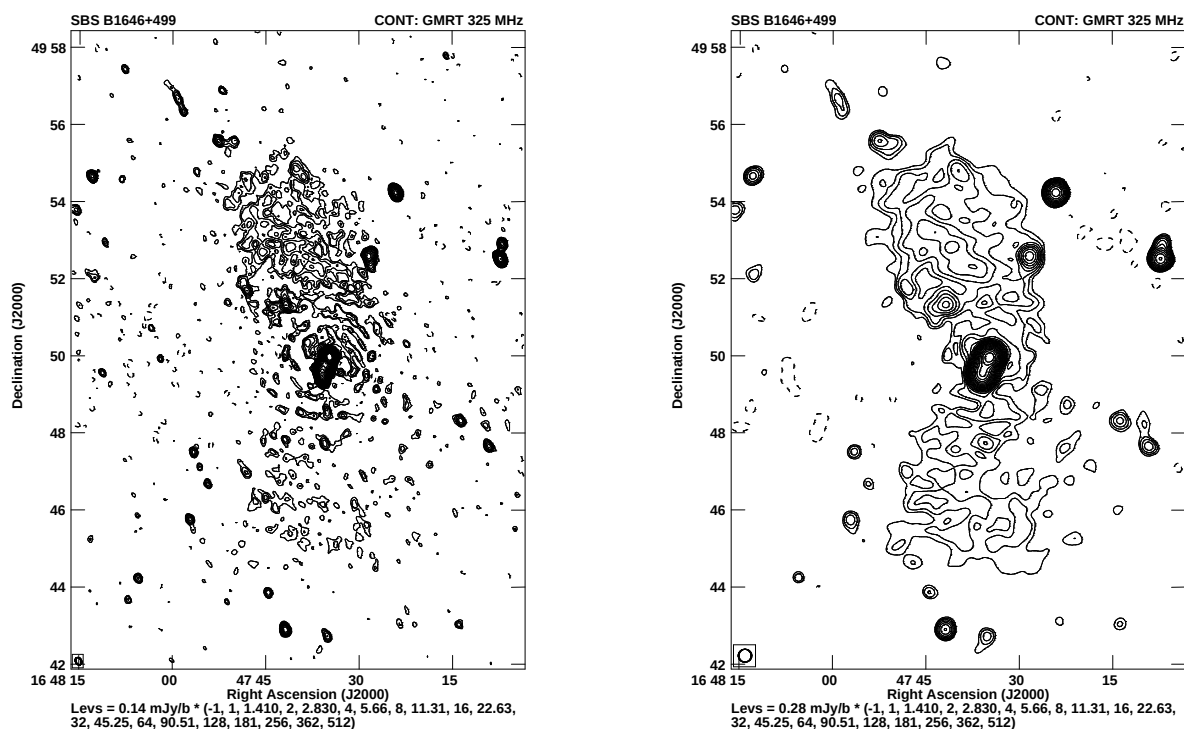
nia: do końcowego obrazowania danych wykorzystano jedynie krótkie bazy interferometru radiowego – uwzględniono dane jedynie z odległości na płaszczyźnie (u, v) mniejszych, bądź równych $5000 \times$ długość obserwowanej fali, osiągając wiązkę wynoszącą $45'' \times 45''$. Końcowa mapa, z uwzględnieniem zarówno struktur zwartych, jak i rozciąglonych została przedstawiona na rys. 3.2.

Ze względu na interesujące rezultaty obserwacji GMRT na częstotliwości 610 MHz, blazar został zaobserwowany ponownie 7 i 8 maja oraz 8 i 9 września 2016 r., na jeszcze niższych częstotliwościach: 325 i 150 MHz. Obserwacje te zostały podobnie zaprojektowane – trwały 8 godzin, włączając kalibrację amplitudy i fazy dla każdej długości fali, przy czym wykorzystane kalibratory amplitudy i fazy dla 325 MHz to 3C 286, 3C 48, 1602+334, a dla 150 MHz – 3C 286, 3C 48 i 1459+716. Szerokości pasm dla 150 i 325 MHz wynosiły 16 i 32 MHz.

Obróbka danych została ponownie wykonana przy użyciu pakietu AIPS, po ich uprzednim przeflagowaniu. Mapa na częstotliwości 325 MHz widoczna na rys. 3.3 (lewy panel) posiada oryginalną zdolność rozdzielczą równą $12''.52 \times 8''.64$, przy średnim poziomie szumów wynoszącym 0.06 mJy/wiązkę. Dla lepszego uwidocznienia struktury okalającej obiekt na częstotliwości 325 MHz – podobnie jak w przypadku obserwacji na 610 MHz – wykonana została także mapa z uwzględnieniem wyłącznie krótkich baz indyjskiego interferometru, przedstawiona na prawym panelu rys. 3.3.

SBS B1646+499 na częstotliwości 150 MHz został przedstawiony na rys. 3.4, wiązka w tym przypadku wynosi $25''.21 \times 15''.24$ przy poziomie szumów o rząd wielkości wyższym – wynoszącym 0.6 mJy/wiązkę. Niestety, ze względu na jakość danych, rozciąglą struktura nie jest w pełni widoczna. Można jedynie

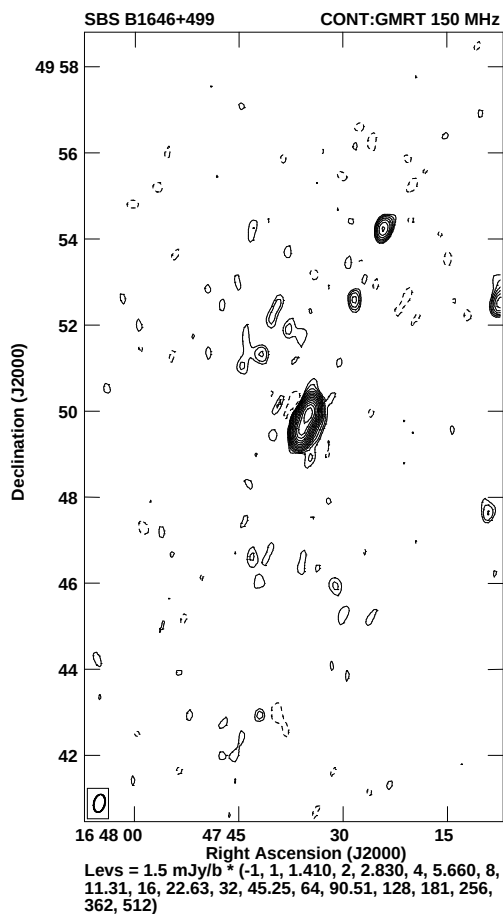
zauważyć słabe ślady emisji dyfuzyjnej naokoło radiowego jądra i dżetu blazara.



Rysunek 3.3: Mapy SBS B1646+499 na częstotliwości 325 MHz, wykonane na podstawie danych z interferometru GMRT. *Lewy panel* przedstawia mapę o oryginalnej wiązce równej $12''.52 \times 8''.64$, natomiast do lepszego zobrazowania struktury rozciąglej obiektu, oryginalna wiązka została rozmyta do wartości $25'' \times 25''$, co pokazano na *prawym panelu*. Zarówno na północ i na południe od źródła centralnego widoczna jest rozległa struktura dyfuzyjna.

Dedykowane obserwacje radiowe – LOFAR

Mając na uwadze niezadowalający wynik obserwacji GMRT na częstotliwości 150 MHz, zaproponowano także wykonanie obserwacji instrumentem LOFAR. Ze względu na wymagającą sprzętowo obróbkę danych z radiointerferometru LOFAR, wykorzystano możliwość współpracy z zespołem *Tier-1 Survey Te-*



Rysunek 3.4: Mapa SBS B1646+499 na częstotliwości 150 MHz, wykonana na podstawie danych z interferometru GMRT. Rozmiar wiązki na mapie wynosi $25''.21 \times 15''.24$.

am, prowadzącym wielkoskalowe przeglądy nieba. Taka współpraca zwiększa możliwość otrzymania większej ilości godzin obserwacyjnych, gdyż obserwowane pole jest jednocześnie wykonywane w ramach przeglądu nieba.

Obserwacje zostały wykonane 5 września 2017 r. [‡] w trybie *HBA Dual Inner* (dane zebrane przez każde pole HBA

[‡]był to kolejny termin obserwacji, gdyż musiały one zostać powtórzone z powodu niewłaściwego ustawienia korelatora COBALT za pierwszym razem

w stacji centralnej są korelowane jako osobne stacje, co zapewnia lepsze pokrycie płaszczyzny (u,v) większą ilością krótkich baz), jedno-sekundowym czasem integracji i rejestracją sygnału w 244 podkanałach w całym paśmie wynoszącym 120–168 MHz (48 MHz szerokości). Rejestrowana częstotliwość centralna wynosiła 150 MHz. Całkowity czas obserwacji był równy 8 godzin, włączając kalibrację nierównoległą, a liczba wykorzystanych stacji teleskopu wynosiła 38, w tym 24 CS i 14 RS. Aby wyeliminować zakłócenia przeprowadzono także *demixing* dla źródła *Cygnus A*, polegający na usunięciu z danych wpływu silnych radioźródeł znajdujących się w polu widzenia teleskopu, a dokładniej – odjęciu skalibrowanych modeli widoczności dla tego jasnego źródła od zebranych danych. Nieporównywalnie duże pole widzenia LOFARa powoduje, że procedurę tą trzeba czasami wykonywać dla obiektów odległych od celu na niebie nawet o kilkadziesiąt stopni (zazwyczaj jest to 30° , jednak jeśli silny obiekt góruje podczas obserwacji, odległość ta może być nawet większa), a wnioskuje się o nią już na etapie pisania wniosku obserwacyjnego.

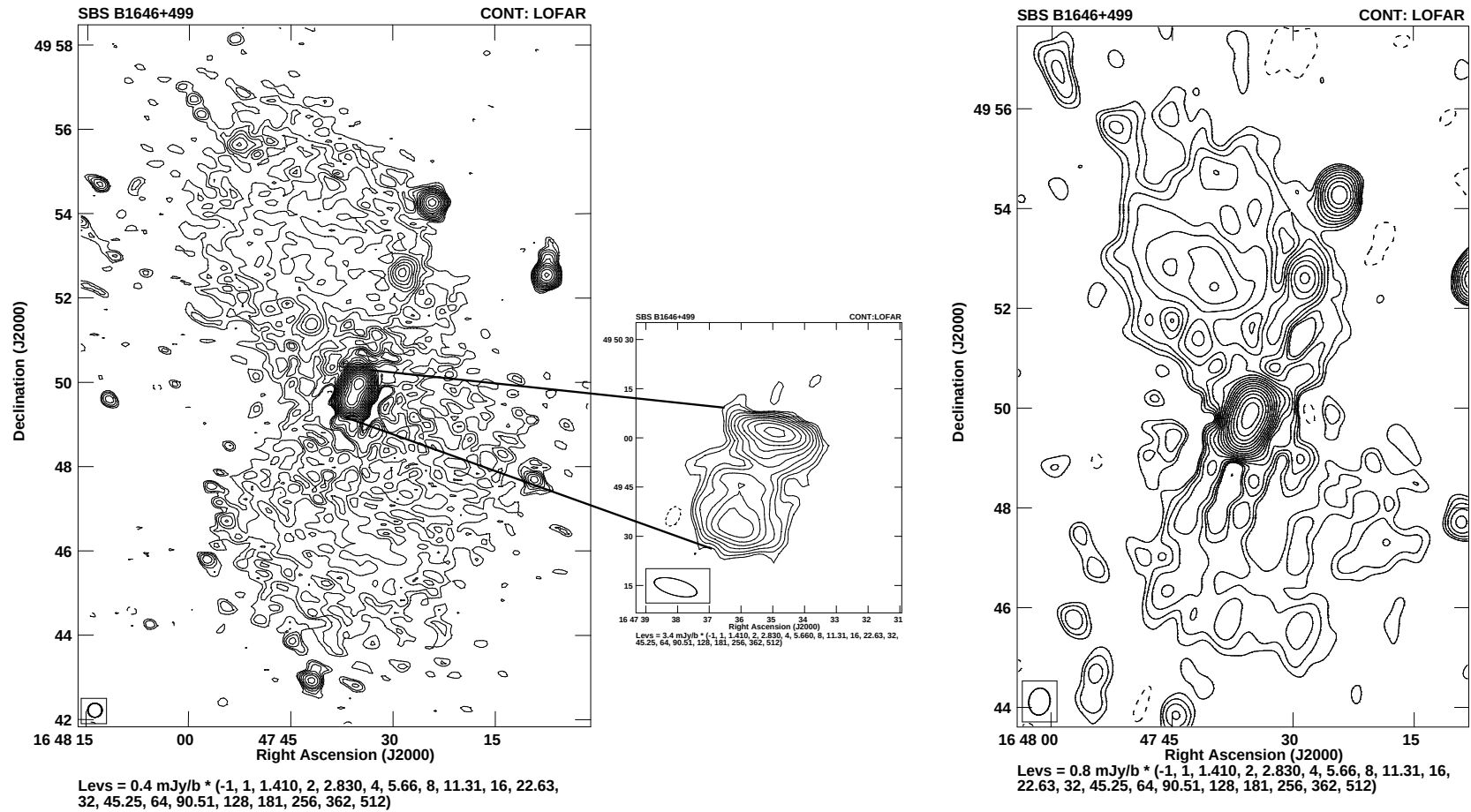
Kończącą mapę z zastosowaniem kalibracji pakietem *killMS* (opisanym na str. 46) przedstawia lewy panel rys. 3.5. Została ona uzyskana po zastosowaniu standardowych metod redukcji i kalibracji danych interferometrycznych, jednak z wykorzystaniem oprogramowania dedykowanego danym z LOFARa (szczegóły są opisane m. in. w pracy [116]). Aby poprawić ich jakość wykorzystano oprogramowanie *Prefactor* – *The LOFAR pre-facet calibration pipeline*[§]. Zapewnia ono m. in. dodatkowe flagowanie danych, ich kalibrację wraz z przeniesieniem rozwiązań na źródło, podział całego zaobserwowanego zakresu danych na podpasma w zależności od obserwowanej częstotliwości.

[§]<https://github.com/lofar-astron/prefactor>

ści, a dla każdego z podpasm – mapy całego pola widzenia teleskopu w niskiej i wysokiej rozdzielczości. Użyta dodatkowo procedura *Initial-Subtract* pozwala na stworzenie modeli nieba do wykorzystania w ewentualnej późniejszej kalibracji zależnej od kierunku z użyciem *Factora* (który został omówiony w następnym akapicie). Ze względu na wymaganą dużą moc obliczeniową i bardzo duże rozmiary plików z danymi, procedury te są wykonywane na klastrach obliczeniowych. W tym przypadku skorzystano z jednostki obliczeniowej należącej do Uniwersytetu Hamburskiego. Końcowa wiązka dla tych obserwacji wynosi $20'' \times 20''$, przy średnim poziomie szumów równym 0.1 mJy/wiązkę.

Aby zwiększyć czułość i rozdzielczość mapy, przeprowadzona została także kalibracja zależna od kierunku *LOFAR Facet Calibration* [116], która wydaje się być niezbędna w przypadku znacznego (kilkustopniowego) pola widzenia teleskopu. Polega ona na podzieleniu wstępnie już skalibrowanego pola widzenia na tzw. fasety, czyli mniejsze obszary na niebie, w taki sposób, aby każdy z nich zawierał źródło, bądź grupę źródeł, stanowiących kalibratory dla takiego fragmentu (jest to tzw. *Tesellacja Woronoja* [83]). Następnie, pola są kalibrowane kolejno, zaczynając od tego, zawierającego najjaśniejszy kalibrator, a na końcowym etapie wykonywane jest obrazowanie całego (lub wybranego fragmentu) zaobserwowanego pola.

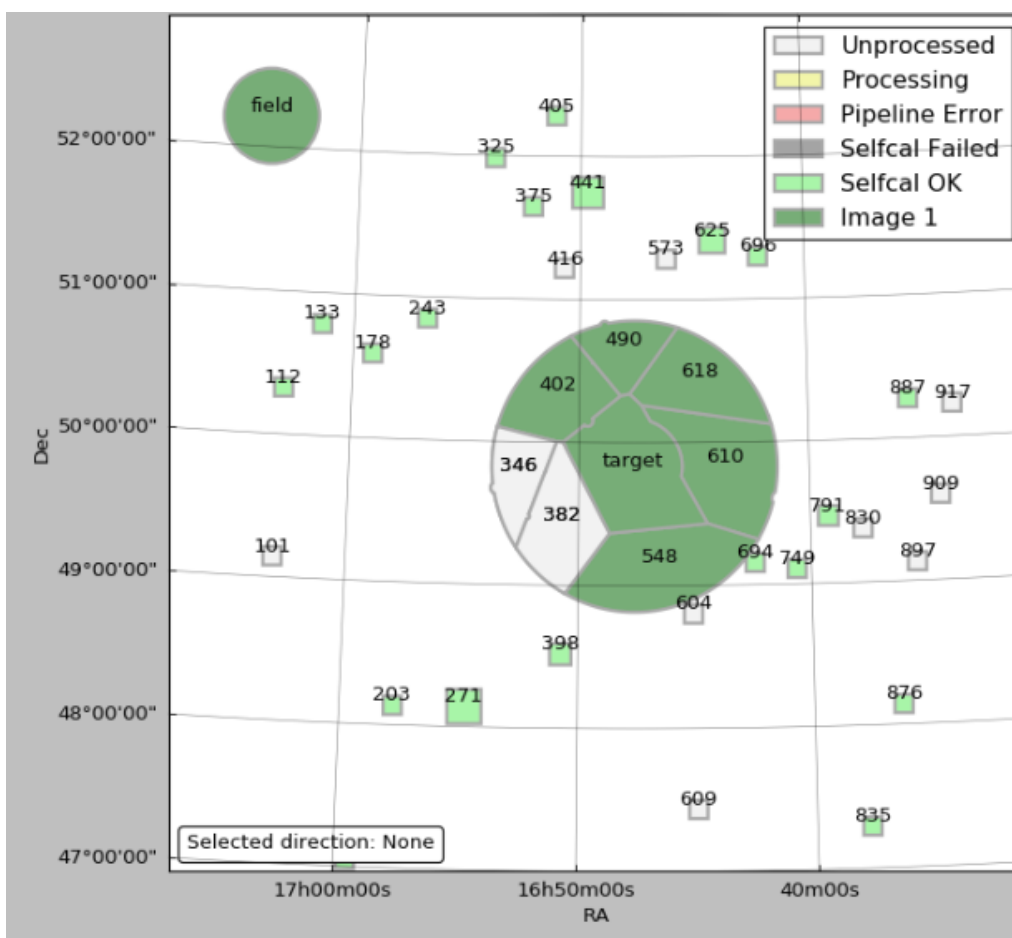
W przypadku obserwacji SBS B1646+499 całkowite pole o przybliżonym rozmiarze $5^\circ \times 5^\circ$ zostało podzielone na 36 faset, w tym osobny fragment został wyznaczony specjalnie dla obserwowanego blazara i skalibrowany za pomocą modelu obliczonego dla najbliższej fasety (podział ten został przedstawiony na rys. 3.6; SBS B1646+499 znajduje się w centralnej fascie *target*). Aby umożliwić poprawną kalibrację najjaśniejszych źródeł



Rysunek 3.5: Blazar SBS B1646+499 zobrazony przy użyciu danych z interferometru LOFAR na częstotliwości centralnej 150 MHz. *Lewy panel* uwidacznia centrum oraz płyty blazara, a ze względu na dużą dynamikę i czułość obserwacji, widać złożoną, postrzępioną strukturę emisji dyfuzyjnej. Rozmiar wiązki dla tych obserwacji wynosi $20'' \times 20''$. *Środkowy panel* pokazuje centrum obiektu po wykonaniu kalibracji LOFAR Factor, z bardzo dużą zdolnością rozdzielczą osiągniętą na długich falach ($13''.40 \times 4''.88$). Na *panelu prawym* przedstawiona została całkowita struktura źródła także po zastosowaniu kalibracji LOFAR Factor oraz przy uwzględnieniu jedynie krótkich baz teleskopu. Niestety, ze względu na zastosowane algorytmy – utracona została część emisji rozciągłej. Rozmiar wiązki dla obserwacji na panelu prawym wynosi $32''.51 \times 25''.45$.

w polu, wykorzystano opcję kalibracji wielorozdzielczościowej. W takim wypadku program najpierw inicjuje kalibrację dla danych z małą zdolnością rozdzielczą ($\sim 20''$), aby w kolejnych krokach czyszczenia mapy przechodzić do końcowej zdolności rozdzielczej, osiągającej około $5''$. Wynikowy, zobrazowany obszar pola widzenia był kołowy, o promieniu 1° , składał się z 8 faset i został tak dobrany, aby jego kalkulacja była zoptymalizowana pod kątem obliczeniowym. Rys. 3.7 oraz 3.8 przedstawiają przykładowe rezultaty kalibracji fasetowej dla dwóch, wybranych, jasnych źródeł w tym polu. Można zauważyć, że wraz z kolejnymi iteracjami, wyniki poprawiają się zarówno dla amplitudy, jak i dla rozwiązań zegara (fazowych), a ze struktury kalibratorów usunięte zostały praktycznie wszystkie artefakty.

Po ukończeniu kalibracji fasetowej uzyskana zdolność rozdzielcza wyniosła $13''.4 \times 4''.88$, przy średniej wartości szumów na mapie równej 0.16 mJy/wiązkę . Rezultat został przedstawiony na środkowym panelu rys. 3.5. Trzeba jednak zauważyć, iż otrzymana wiązka stała się silnie eliptyczna, a znaczna część struktury rozciąglej została utracona kosztem zwiększenia zdolności rozdzielczej wynikowej mapy. Stało się tak ponieważ zazwyczaj dane pochodzące z krótkich baz interferometru są gorszej jakości, niż dane z baz długich, ze względu na większe prawdopodobieństwo wystąpienia zakłóceń, które nie zostaną wytłumione podczas korelacji sygnału (gdyż zostaną niemal równocześnie odebrane przez pobliskie anteny). Algorytm tej kalibracji, stosując dodatkowe metody czyszczenia danych, usuwa zatem głównie dane z baz krótkich, odpowiedzialne za duże kątowno struktury na niebie. Z kolei w pewnych przypadkach, usunięcie wadliwych danych z kilku konkretnych stacji może sprawić, że wynikowa wiązka nie będzie kołowa (uwzględniając, że wartość deklinacji obiektu nie wpływa znacznie na kształt



Rysunek 3.6: Obszar na niebie zawierający obiekt SBS B1646+499 uzyskany za pomocą oprogramowania służącego do kontroli rezultatów kalibracji zależnej od kierunku LOFAR Factor. Poszczególne kalibratory w całym polu $5^\circ \times 5^\circ$ zostały oznaczone numerami, blazar SBS B1646+499 znajduje się w centralnej fascie. Algorytm wykonuje kalibrację dla wszystkich kalibratorów posiadających strumień powyżej wybranego limitu, jednak jedynie pole wewnątrz okręgu zostanie poddane obrazowaniu.

wiązki). Struktura rozciągała jest widoczna jedynie po rozmyciu wiązki, które osiągnięte zostało poprzez wybranie z całego zakresu (u, v) jedynie danych pochodzących z krótkich baz interferometru (mapa została przedstawiona na rys. 3.5, prawy panel, zdolność rozdzielcza wynosi $32''.51 \times 25''.45$).

Powyższa metoda kalibracji zależnej od kierunku jest zaleca-

na zarówno do obróbki danych przeglądowych, jak i indywidualnych projektów obserwacyjnych (w tym – pojedynczym osobom niezwiązanym z pracą nad wielkoskalowymi przeglądami nieba). Oprogramowanie to jest publicznie dostępne, z możliwością dokonywania obliczeń na holenderskim klastrze *CEP3*, na którym jest ono zainstalowane i wspierane. Dokumentacja *LOFAR Facet Calibration* jest rozbudowana, w przeciwieństwie, do dokumentacji pakietów opisanych poniżej.

Analogicznym, jednak mniej znanym i dostępnym oprogramowaniem jest *killMS*[¶]. Jest to pakiet służący do kalibracji danych interferometrycznych zależnej od kierunku, opracowany przez Cyrila Tasse (Obserwatorium w Paryżu, SKA, Uniwersytet Rhodes) i wykorzystywany do opracowywania m. in. danych z przeglądu *Tier-1*, ze względu na bardzo dobrą optymalizację czasu obliczeniowego. Jego metoda działania jest podobna do działania *LOFAR Facet Calibration*, najpierw tworzy się obraz nieba po kalibracji niezależnej od kierunku, następnie wydziela się 10 osobnych kierunków, szuka rozwiązań macierzy skalarnych Jones’a w każdym z nich, dokonuje dekonwolucji mapy oraz obrazowania poprawionego obrazu. Porównywalne rezultaty zostały także otrzymane z wykorzystaniem pakietu *SAGECal*^{||}.

Dedykowane obserwacje radiowe – JVL A

Obserwacje interferometrem JVL A przeprowadzone zostały 14 i 28 lutego 2017 r. dla pasma S, w konfiguracji D oraz 19 czerwca 2017 r. dla pasma C, w konfiguracji C – na podstawie wniosku o obserwacje obiektu SBS B1646+499. Konfigura-

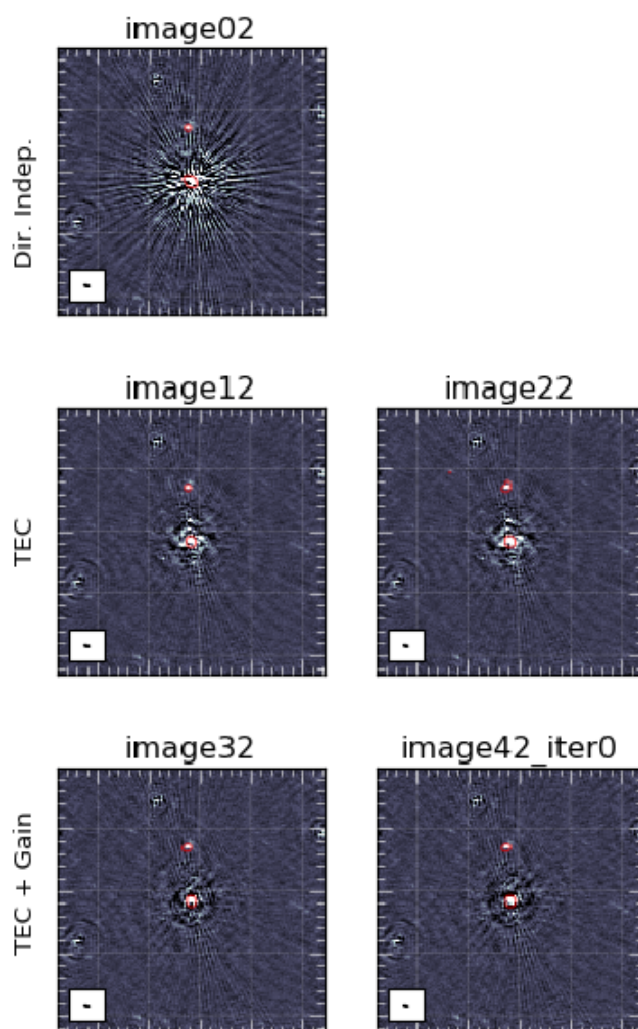
[¶]raport C. Tasse *Wirtinger calibration and spectral deconvolution for the lowfrequency radio surveys*, www.astron.nl/radio-observatory/lofar-system-capabilities/major-observing-modes/interferometric-mode/processing-1

^{||}raport E. Orru *Commissioning results for DDRG 1835+62*, www.astron.nl/radio-observatory/lofar-system-capabilities/major-observing-modes/interferometric-mode/processing-1

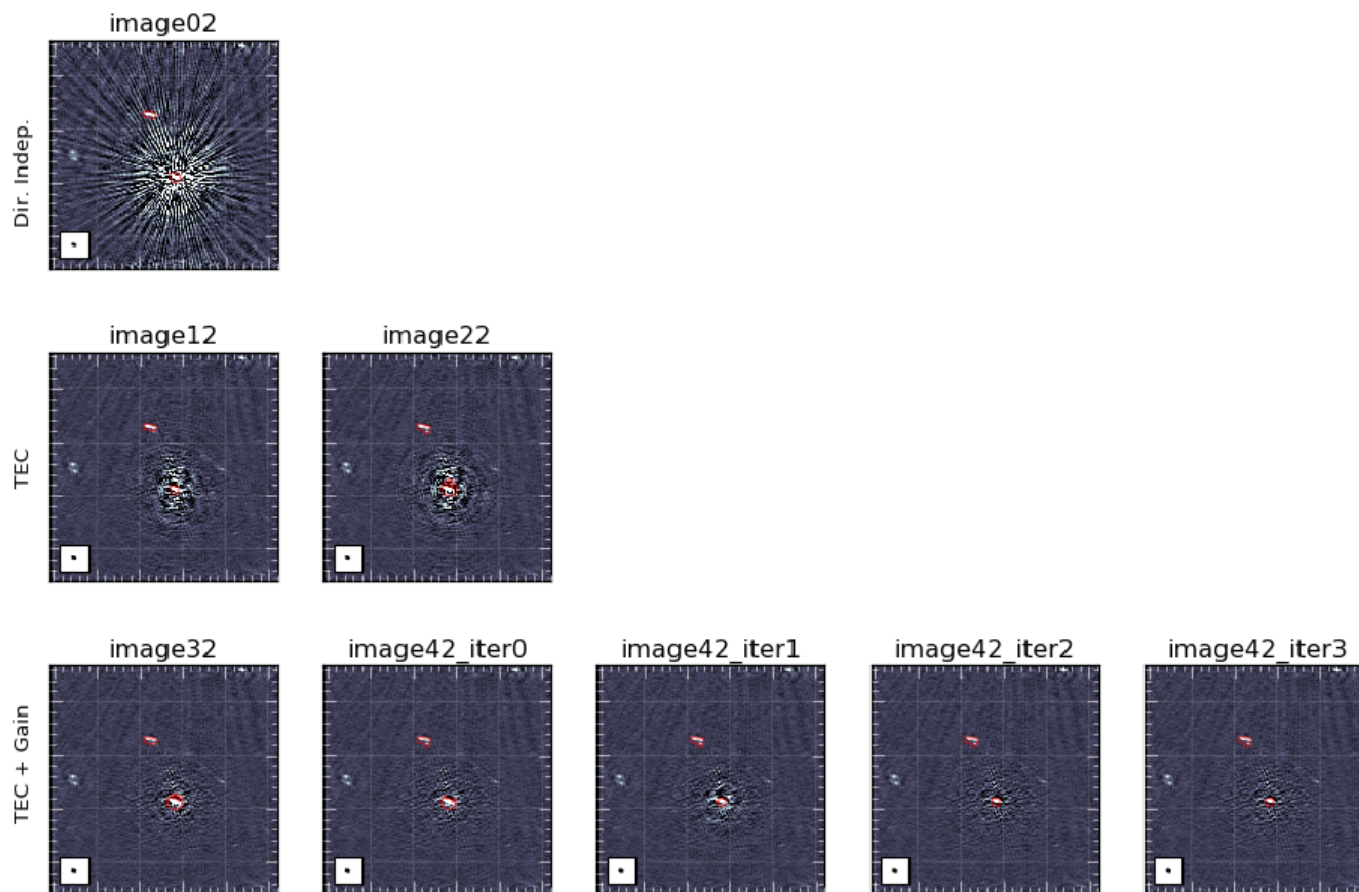
cja D, z maksymalną długością bazy wynoszącą około 1 km, zapewniając najwęższy rozstaw anten JVL A, gwarantuje największą czułość na struktury rozciągle. JVL A w konfiguracji C posiada natomiast anteny rozsunięte na odległość do 3.4 km i stanowi kompromis pomiędzy zdolnością rozdzielczą a czułością. Dla pasma S obserwowany zakres częstotliwości został podzielony na dwa pasma o szerokości 1 GHz każde, z częstotliwościami centralnymi równymi 2.75, 3.25 GHz, przy czym sygnał był rejestrowany w systemie 8-bitowym. Z kolei dla pasma C, szerokość całego obserwowanego pasma była jeszcze większa – dwa razy po 2 GHz, przy 3-bitowych obserwacjach, dla częstotliwości centralnych ustawionych na 5.25 i 7.20 GHz.

Redukcja, kalibracja oraz obrazowanie danych zostały wykonane z wykorzystaniem pakietu *Common Astronomy Software Applications* (CASA)**. Mapy blazara w paśmie S i C zostały przedstawione na rys. 3.9 (kolejno na lewym i prawym panelu). Rozmiary wiązek oraz średnie poziomy szumów dla tych map wynoszą $25''.24 \times 22''.34$, 0.03 mJy/wiązkę (lewy panel) oraz $5''.44 \times 4''.02$, 0.15 mJy/wiązkę (prawy panel). Trzeba jednak zaznaczyć, iż ze względu na ograniczoną dostępność czasu na amerykańskim instrumencie, obserwacje trwały za krótko, aby w pełni pokryć płaszczyznę (u, v) , co wpłynęło na jakość otrzymanych danych. W szczególności mapa w paśmie C ma niewielki walor naukowy.

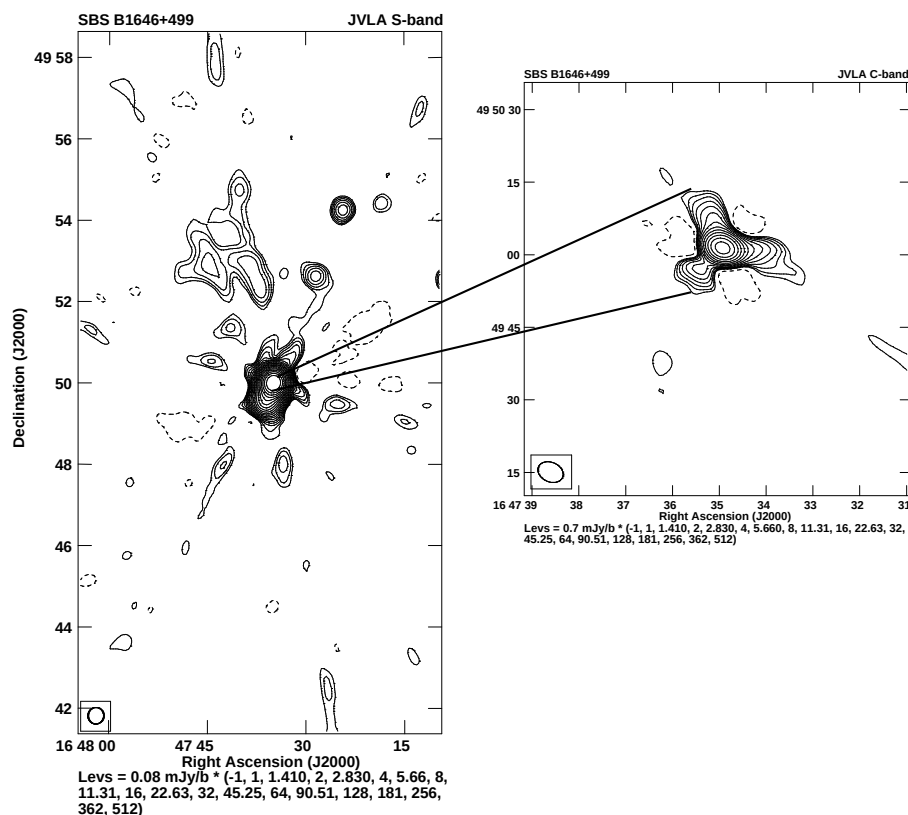
**<https://casa.nrao.edu>



Rysunek 3.7: Przykładowy rezultat kalibracji zależnej od kierunku LOFAR Factor. Na poszczególnych obrazkach widać wybrane źródło kalibracyjne, począwszy od pierwotnej mapy (skalibrowanej niezależnie od kierunku; pierwszy wiersz). Drugi wiersz zawiera wyniki kolejnych iteracji kalibracji fazy, trzeci natomiast – wyniki kolejnych iteracji kalibracji fazy i amplitudy. Można zauważyć, że kalibrator nie składa się z jednego źródła punktowego.



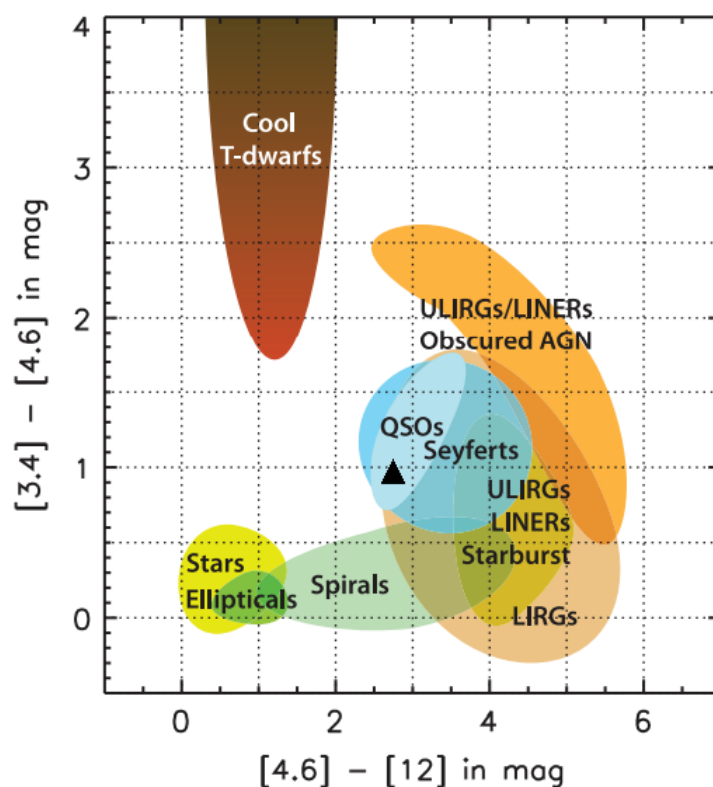
Rysunek 3.8: Kolejny przykład wyniku kalibracji zależnej od kierunku LOFAR Factor. Podobnie, jak na rys. 3.7, na poszczególnych obrazkach widać wybrane źródło kalibracyjne, począwszy od pierwotnej mapy (skalibrowanej niezależnie od kierunku; pierwszy wiersz). Drugi wiersz zawiera wyniki kolejnych iteracji kalibracji fazy, trzeci natomiast – wyniki kolejnych iteracji kalibracji fazy i amplitudy. Struktura tego kalibratora także nie jest punktowa.



Rysunek 3.9: Mapy SBS B1646+499 wykonane na podstawie danych z interferometru JVLA w konfiguracji D w pasmach S (*lewy panel*) i C (*prawy panel*). Rozmiary wiązek dla tych map wynoszą kolejno $25''.24 \times 22''.34$, $5''.44 \times 4''.02$. Ze względu na stosunkowo wysoką częstotliwość obserwacji, rozciągnięta struktura o stromym widmie jest słabo widoczna. Niemniej jednak mapa końcowa ma niższą średnią wartość szumu, niż przeglądowe dane pochodzące z NVSS, na których strumień emisji dyfuzyjnej ledwo przewyższa trzykrotny poziom szumu na mapie.

3.3.2 Obserwacje optyczne i w podczerwieni

Dane na temat jasności blazara SBS B1646+499 w optycznym zakresie częstotliwości zostały zebrane przez *Intermediate Palomar Transient Factory* w okresie od 7 maja 2009 r. do 6 sierpnia 2014 r. w filtrach g oraz R (PTF DR3, szczególnie opis katalogu zawarty jest w pracach [63] [93]). Ampli-



Rysunek 3.10: Diagram kolor-kolor z pracy [119]. Czarnym trójkątem zaznaczona została pozycja blazara SBS B1646+499, wyliczona na podstawie podczerwonych obserwacji w trzech różnych filtrach satelity WISE.

tuda jasności obiektu w filtrze systemu Johnsona R wynosiła w tym przedziale czasu 0.88 mag, z maksymalną wartością 15.04 ± 0.03 mag (4 kwietnia 2012 r.). Minimalna jasność równa 15.92 ± 0.18 mag została zmierzona 5 sierpnia 2010 r.

Z kolei dane zaczerpnięte z satelitarnego przeglądu *Wide-field Infrared Survey Explorer* (WISE; [119]) razem z danymi na najwyższych energiach przedstawione zostały w tabeli 3.2. Kolumna 1 tej tabeli zawiera nazwę przeglądu i nazwę katalogową źródła, kolumna 2 zawiera zakres obserwowanych energii lub wartości częstotliwości dla maksymalnej przepustowości filtrów WISE, a strumień i referencje zostały zawarte w kolumnach 3 i 4. Wartości jasności w filtrach W1, W2, W3 i W4 pozwalają obliczyć kolor widocznego obiektu, na podstawie róż-

nicy W1–W2 oraz W2–W3. Dla różnic wynoszących kolejno 0.92 mag oraz 2.77 mag widać, iż wkład od gorącego, pyłowego torusa do całkowitego promieniowania rejestrowanego w średniej podczerwieni dla tego blazara jest znaczący (na podstawie diagramu kolor-kolor z pracy [119], rys. 3.10).

Dane w zakresie optycznym i podczerwonym posłużyły także do sprawdzenia, czy rozciągnięta emisja radiowa nie pochodzi od źródeł tła, znajdujących się w pobliżu obiektu. Jak zostało wspomniane wcześniej, identyfikacja emisji dyfuzyjnej z którymkolwiek z obiektów tła naokoło SBS B1646+499 została wykluczona.

3.3.3 Obserwacje w paśmie rentgenowskim i gamma

Radioźródło SBS B1646+499 posiada swój odpowiednik w zakresie wysokich energii, zarówno w miękkim (ROSAT), jak i w twardym (*XMM-Newton Slew Survey*, XMMSL1) zakresie promieniowania rentgenowskiego. Wartości strumienia blazara z tych przeglądów zostały zawarte w tabeli 3.2.

Blazar ten, jako że został zarejestrowany także przez instrument *Large Area Telescope* (LAT) na pokładzie satelity *Fermi*, znajduje się w katalogu *LAT 4-year Point Source Catalog* (3FGL). Jego średni strumień fotonowy także został zawarty w tab. 3.2.

3.4 Niskoenergetyczny komponent widm blazarów

Jak zostało wspomniane w rozdziale 2, rozkład energii widmowej blazarów posiada charakterystyczny bimodalny profil, będący efektem działania procesów z udziałem leptonów lub leptonów i hadronów. Dostępność obserwacji w praktycznie całym przedziale widma elektromagnetycznego pozwala modelować rozkłady energii i wyciągać wnioski m. in. odnośnie natury

Tabela 3.2: Pomiary strumienia dla blazara SBS B1646+499 w podczerwieni, w paśmie rentgenowskim i w promieniowaniu gamma.

Przegląd Numer katalogowy (1)	Zakres energii (2)	Strumień (3)	Ref. (4)
WISE	$3.4\mu\text{m}$	$11.23 \pm 0.02 \text{ mag}$	a
J164734.91+495000.5	$4.6\mu\text{m}$	$10.31 \pm 0.02 \text{ mag}$	a
	$12\mu\text{m}$	$7.53 \pm 0.02 \text{ mag}$	a
	$22\mu\text{m}$	$5.45 \pm 0.03 \text{ mag}$	a
ROSAT J164735.4+495001	0.1–2.4 keV	$0.869 \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	b
XMMSL1 J164734.8+495013	2–10 keV	$(0.53 \pm 0.19) \times 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	c
3FGL J1647.4+4950	1–100 GeV	$(1.47 \pm 0.10) \times 10^{-9} \text{ foton cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	d

Kol. 4: (a) [119]; (b) [74]; (c) [118]; (d) [2].

regionu emisji i natężenia pola magnetycznego galaktyki aktywnej.

Chociaż badania nad modelami emisji blazarów trwają już od wielu lat i wzbogacane są o dane z nowoczesnych instrumentów, kilka kwestii pozostaje nadal niewyjaśnionych. Jedną z nich stanowi bardzo szybka zmienność obiektów typu BL Lac (w skali rzędu minut zamiast oczekiwanych zmian rzędu godzin), a także dokładna lokalizacja regionu emisji promieniowania gamma, czy umiejscowienie maksimum emisji synchrotronowej w przedziale częstotliwości [25].

W niektórych przypadkach można też zauważyć, że niezależnie od wybranych modeli, dopasowane krzywe znacznie odbiegają od danych obserwacyjnych dla najniższych częstotliwości (zakres obserwacji radiowych). Prace [122] oraz [39] prezentują przykłady takich właśnie widm dla dwóch znanych blazarów: Mrk 421 i 3C 371 (opisanych w par. 2.2). W pierwszej z nich, autorzy badają prawdopodobne fizycznie modele emisji stacjonarnej dla lacertyd posiadających maksimum emisji syn-

chrotronowej w zakresie powyżej 10^{15} Hz (HBLs) i sprawdzają, czy istnieją cechy pozwalające odróżnić hadronowe pochodzenie emisji od leptonowego. Autorzy drugiej pracy proponują reklasyfikację wybranych lacertyd ze względu na cechy widmowe i szerokości linii emisyjnych charakterystyczne dla FSRQs.

Widmo Mrk 421 z dopasowanym modelem SSC przedstawione zostało w pracy [122] na rys. 10, natomiast rys. 7, trzeci panel, z publikacji [39] zawiera widmo obiektu 3C 371 z jednostrefowym modelem leptonowym. W obu przypadkach wyraźnie widać, iż dane w zakresie radiowym (dokładniej – poniżej 10^{12} Hz) wykazują niezgodność z dopasowanymi modelami powyżej jednego rzędu wielkości w przedziale częstotliwościowym.

Rozbieżności te można jednak wytłumaczyć uwzględniając emisję dyfuzyjną naokoło tych obiektów: za sprawą dodatkowego strumienia rozciągniętego, zmierzone wartości strumienia są wyższe, niż przewidziane przez model, w którym emisja pochodzi głównie z radiowego centrum. Podobnie w przypadku blazara SBS B1646+499, będącego głównym tematem rozprawy, można zauważyć zależność wartości strumienia radiowego od wybranej metody pomiaru/ zdolności rozdzielczej dostępnych danych. Niestety, pomiar strumienia dla różnych obszarów (struktur) dających przyczynę do emisji jest prawie niemożliwy. Powodem jest problem z osiągnięciem zadowalającej zdolności rozdzielczej na najdłuższych obserwowanych falach. Za pomocą interferometrów LOFAR i GMRT można jednak próbować dowieść prawdziwości tezy zawartej na początku tego akapitu, co zostało opisane poniżej.

Dobierając spośród dostępnych danych archiwalnych takie, które uwzględniają w dużej mierze jedynie radiowe centrum, czyli wykonane w odpowiedniej konfiguracji dane VLA oraz z przeglądu TGSS ADR1 (który oferuje bardzo dobrą zdolność

rozdzielczą ($20''$) na niskiej (150 MHz) częstotliwości), można przynajmniej częściowo zmierzyć maksymalny strumień^{††}. Będzie on zawyżony ze względu na wpływ emisji dyfuzyjnej, która w przypadku danych z GMRT może zostać wykluczona poprzez odpowiedni dobór zakresu płaszczyzny (u, v) . Rysunki 3.11, 3.12 i 3.13 przedstawiają fragmenty widm radiowych dla blazarów: 3C 371, Mrk 421 oraz SBS B1646+499. Zawarte na nich zostały wybrane dane pomiarowe dla maksimum strumienia $S_{\nu, \text{peak}}$ wraz z dopasowaną funkcją potęgową (czarne kropki, linia ciągła) oraz dane archiwalne z dopasowaniem funkcji potęgowej, uwzględniające całość emisji konkretnego blazara $S_{\nu, \text{all}}$ (puste kwadraty, linia przerywana). Skorzystano z obserwacji poniżej 500 MHz dla każdego z obiektów, zaczerpniętych z bazy *NASA/IPAC Extragalactic Database* lub – w przypadku SBS B1646+499 – z obserwacji własnych. Parametry dopasowań (rys. 3.11) dla obiektu 3C 371 są następujące:

$$\log S_{\nu, \text{peak}} = (1.13 \pm 0.04) \log \nu - (24.07 \pm 0.36),$$

$$\log S_{\nu, \text{all}} = (0.41 \pm 0.09) \log \nu - (17.48 \pm 0.71).$$

Dla obiektu Mrk 421 (rys. 3.12) parametry te wynoszą:

$$\log S_{\nu, \text{peak}} = (0.86 \pm 0.03) \log \nu - (21.91 \pm 0.29),$$

$$\log S_{\nu, \text{all}} = (0.68 \pm 0.04) \log \nu - (20.14 \pm 0.35).$$

Natomiast dla blazara SBS B1646+499 (rys. 3.13) parametry funkcji zostały zawarte poniżej:

$$\log S_{\nu, \text{peak}} = (1.32 \pm 0.25) \log \nu - (26.48 \pm 2.10),$$

$$\log S_{\nu, \text{all}} = (0.76 \pm 0.34) \log \nu - (21.45 \pm 2.79).$$

^{††}Jeżeli nie zaznaczono inaczej, w całej pracy maksimum strumienia (strumień źródła punktowego) został wyznaczony poprzez dopasowanie profilu Gaussa i określenie wartości strumienia dla maksimum funkcji.

Na podstawie wartości współczynników kierunkowych dla powyższych dopasowań można zauważyć, że dla każdego z tych blazarów, dane zawierające głównie strumień struktur zwartych bliższe są modelom zawartym w powyższych publikacjach. Wartość współczynnika kierunkowego dla dopasowania $\log S_{\nu, \text{peak}}$ stanowi bowiem od 127 do 276 % wartości współczynnika kierunkowego dla $\log S_{\nu, \text{all}}$.

Dane wykorzystane do pomiarów strumienia struktur zwartych zawarto ponadto w tabeli 3.3. Kolumna 1 tej tabeli zawiera nazwę obiektu, kolumny 2–4: częstotliwość obserwacji, nazwę instrumentu oraz rozmiar wiązki, w kolumnie 5 zawarte zostało źródło danych, na podstawie których dokonano pomiarów. Ich nieznaczna ilość wynika z braku dostępności obserwacji o odpowiedniej konfiguracji wykluczającej wkład od struktur wielkoskalowych (największe konfiguracje VLA, A oraz B) oraz odpowiedniej zdolności rozdzielczej^{††}. Dodatkowe dane obserwacyjne wkrótce powinny być jednak dostępne za sprawą publikacji przeglądu LOFAR *Tier-1* o zdolności rozdzielczej kilkakrotnie przekraczającej średnią wielkość wiązki dla TGSS ADR1.

Podkreślając konieczność uzupełnienia danych, trzeba zauważyć, iż analiza ta pokazuje w jaki sposób można wytłumaczyć problem niezgodności modeli promieniowania blazarów z danymi obserwacyjnymi na niskich częstotliwościach radiowych dla niektórych obiektów. Takim rozwiązaniem mogłoby być uwzględnienie w modelowaniu dodatkowej składowej odzwierciedlającej wkład od niskoenergetycznej emisji dyfuzyjnej, bądź przeprowadzanie odpowiednich pomiarów strumienia w zakresie radiowym, wykluczających emisję struktur rozciągniętych.

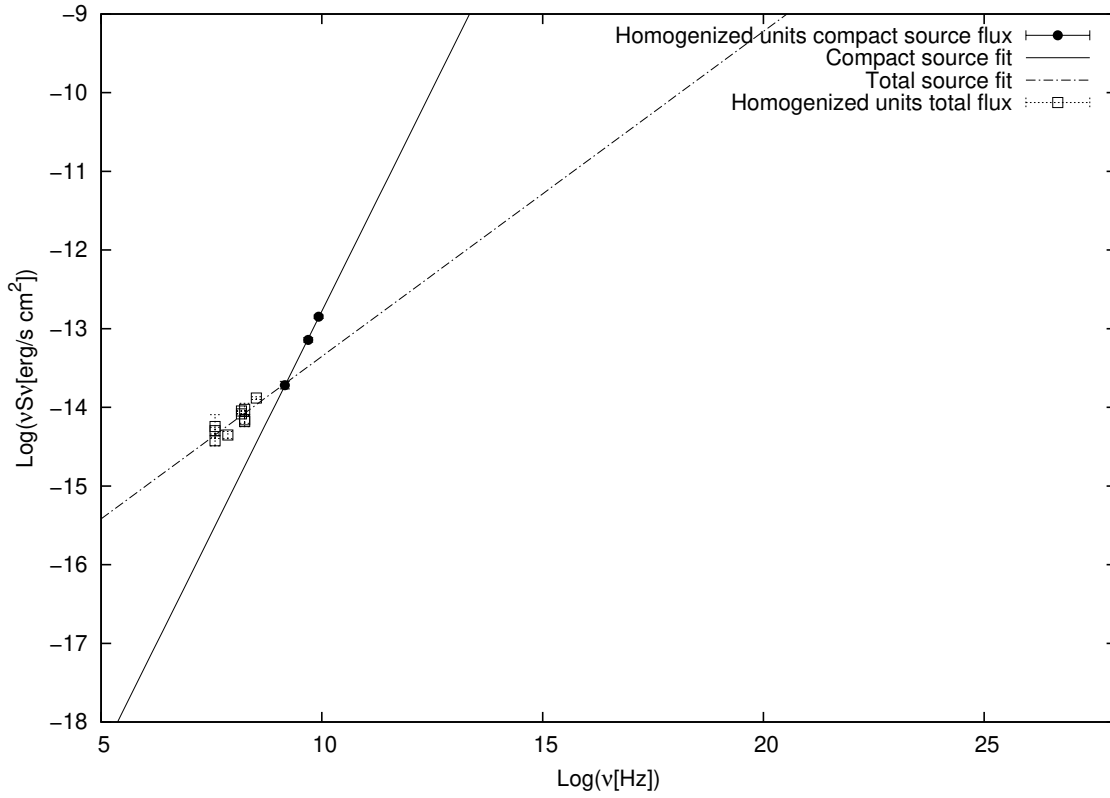
^{††}Z tego powodu z analizy wykluczony został opublikowany niedawno przegląd GLEAM ([48]; rozmiar wiązki około $200'' \times 200''$ w zależności od dokładnej częstotliwości obserwacji), dane z przeglądów Cambridge (zdolność rozdzielcza około kilku minut łuku) oraz VLSSr (z wiązką równą $74'' \times 74''$).

Tabela 3.3: Dane wykorzystane do pomiarów strumienia punktowego dla niskich częstotliwości radiowych obiektów 3C 371, Mrk 421 i SBS 1646+499.

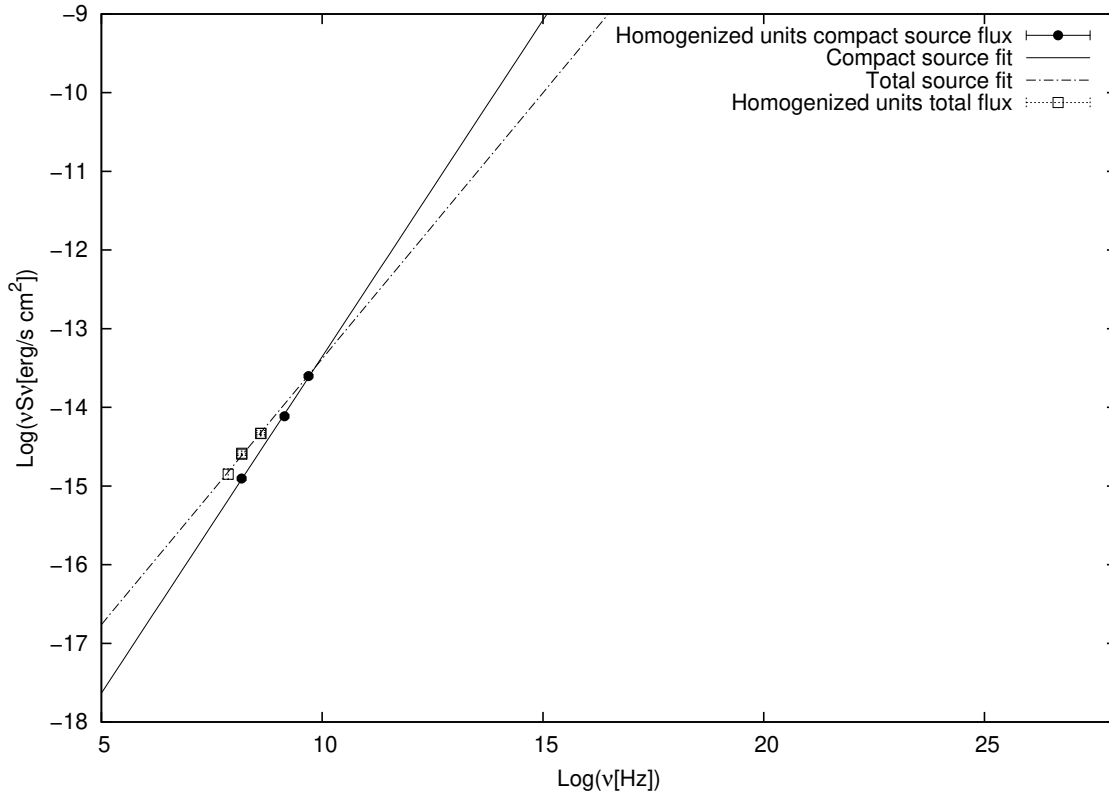
Obiekt	Częstotliwość MHz	Instrument	Rozmiar wiązki "	Przegląd/ Ref.
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
3C 371	1450	VLA B/B	6.09×4.21	a
	4890	VLA A/A	0.6×0.36	a
	8440	VLA A/A	0.31×0.20	a
Mrk 421	150	GMRT	25×25	b
	1410	VLA B/B	5.4×5.4	c
	4890	VLA A/A	0.54×0.37	a
SBS B1646+499	150	LOFAR	13.4×4.88	d
	150	GMRT	25.21×15.24	d
	325	GMRT	12.52×8.64	d
	610	GMRT	6.72×4.69	e
	1410	VLA B/B	5.4×5.4	e

Kol. 5: (a) archiwum NRAO VLA Archive; (b) TGSS ADR1; (c) FIRST; (d) ta praca; (e) [89]

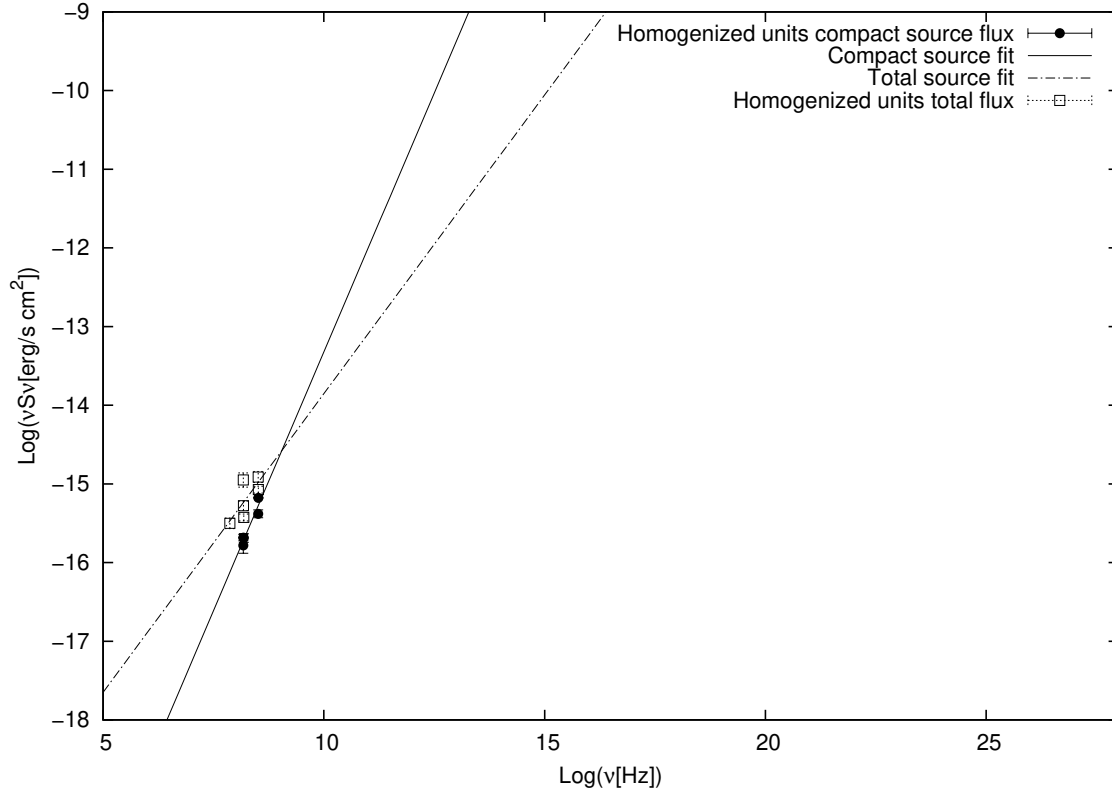
W niniejszej pracy zostały zaprezentowane 3 przykłady takich blazarów, jednakże istnieje więcej obiektów, dla których emisja w zakresie najniższych energii znacznie wzrasta i – w przypadku dostępności modeli promieniowania dla tych źródeł – można stwierdzić, iż jest ona z nimi niezgodna. Są to m. in.: B1215+303, B0219–164, Mrk 180 (rys. 2.4 i 2.5) i B0912+297.



Rysunek 3.11: Niskoenergetyczna część rozkładu energii spektralnej blazara 3C 371. Linia przerywana reprezentuje dopasowanie funkcji potęgowej do danych archiwalnych, uwzględniających emisję całkowitą, natomiast linia ciągła przedstawia dopasowanie funkcji potęgowej do danych archiwalnych uwzględniających jedynie zwarte, radiowe centrum blazara. Czarne punkty przedstawiają wartości strumienia struktur zwartych, natomiast puste – wartości strumienia z danych archiwalnych (emisja całkowita).



Rysunek 3.12: Niskoenergetyczna część rozkładu energii spektralnej blazara Mrk 421. Linia przerywana reprezentuje dopasowanie funkcji potęgowej do danych archiwalnych, uwzględniających emisję całkowitą, natomiast linia ciągła przedstawia dopasowanie funkcji potęgowej do danych archiwalnych uwzględniających jedynie zwarte, radiowe centrum blazara. Czarne punkty przedstawiają wartości strumienia struktur zwartych, natomiast puste – wartości strumienia z danych archiwalnych (emisja całkowita).



Rysunek 3.13: Niskoenergetyczna część rozkładu energii spektralnej blazara SBS B1646+499. Linia przerywana reprezentuje dopasowanie funkcji potęgowej do danych archiwalnych oraz obserwacji opublikowanych w niniejszej pracy, uwzględniających emisję całkowitą, natomiast linia ciągła przedstawia dopasowanie funkcji potęgowej do danych archiwalnych i nowych obserwacji, uwzględniających jedynie zwarte, radiowe centrum blazara. Czarne punkty przedstawiają wartości strumienia struktur zwartych, natomiast puste – wartości strumienia z danych archiwalnych (emisja całkowita).

Rozdział 4

Opis i interpretacja wyników

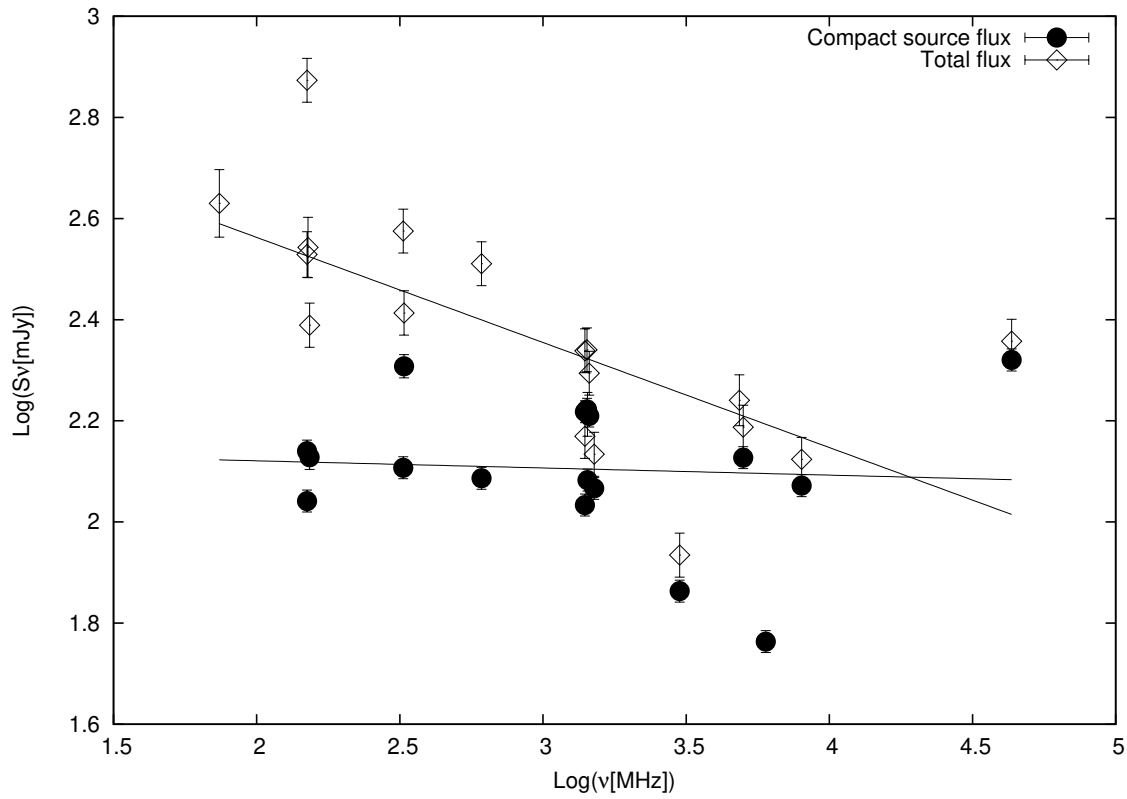
Rozdział czwarty zawiera rezultaty badań nad obiektem SBS B1646+499 obejmujące analizę rozkładu energii widmowej oraz indeksu spektralnego, a także emisji ze struktur zwartych i rozciągniętych. Tą część pracy kończą wnioski i dyskusja na temat przeszłej precesji dżetu blazara, a także podsumowanie całej rozprawy i uwagi od autorki.

4.1 Rezultaty badań blazara SBS B1646+499

4.1.1 Rozkład energii spektralnej

W celu analizy rozkładu energii spektralnej SBS B1646+499 zebrano obserwacje w zakresie częstotliwości od 74 MHz do 43.3 GHz (rys. 4.1), a także zwizualizowano widmo szerokopasmowe w całym dostępnym pomiarowo dla tego źródła zakresie energii (rys. 4.2). Dane zawarte na rys. 4.1 zostały także umieszczone w tabeli 4.1 i pochodzą z obserwacji archiwalnych, jak i z otrzymanych w trakcie przygotowywania niniejszej rozprawy. Kolumny 1–3 zawierają częstotliwość centralną obserwacji, informacje o wykorzystanym teleskopie (przeglądzie, konfiguracji VLA) oraz rozmiar wiązki. Kolumny 4–6 opisują średni poziom szumu na mapach, maksymalny strumień zwanego jądra radiowego oraz zintegrowany strumień struktury całkowitej (radiowe jądro wraz z dżetem oraz emisją rozciągniętą, jeżeli została zarejestrowana). Referencje do użytych danych

zawarte zostały w kolumnie 7. Wszystkie pomiary zostały wykonane samodzielnie, za wyjątkiem danych z przeglądu 6C [97], dane oznaczone indeksem * zostały skalibrowane i zobrazowane przez autorkę niniejszej rozprawy. Dla obserwacji ze zdolnością rozdzielczą powyżej $75''$, nie zmierzono maksymalnego strumienia zwartego jądra radiowego, gdyż niemożliwe jest wyróżnienie poszczególnych struktur blazara. Wartości maksimum strumienia zmierzone dla obiektu w paśmie L ukazują zmienność tego źródła przewyższającą 50 mJy (należy jednak mieć na uwadze różne rozmiary wiązek dla tych map).



Rysunek 4.1: Radiowe widmo blazara SBS B1646+499 (patrz tab. 4.1). Puste czworokąty oznaczają wartości strumienia zintegrowanego, czarne kropki odpowiadają natomiast wartościom maksymalnego strumienia dla wewnętrznej struktury źródła (strumień źródła punktowego).

Widmo radiowe SBS B1646+499 jest złożone z trzech komponentów: stromego widma halo, rozciągniętego, kilo-parsekowego dżetu oraz jądra wykazującego samo-absorpcję. Dla pomiarów strumienia części wewnętrznej źródła (jądra oraz dżetu) $S_{\nu, \text{inn}}$ oraz dla pomiarów strumienia całkowitego $S_{\nu, \text{tot}}$ parametry dopasowanego modelu potęgowego są to kolejno:

$$\log S_{\nu, \text{inn}} = (-0.01 \pm 0.05) \log \nu + (2.15 \pm 0.17)$$

oraz

$$\log S_{\nu, \text{tot}} = (-0.21 \pm 0.05) \log \nu + (2.98 \pm 0.17).$$

Po odjęciu emisji jądra i dżetu od strumienia całkowitego widmo zdecydowanie stromieje, co jest związane ze starzejącą się populacją elektronów emisji rozciągniętej.

Na podstawie zebranych danych widmowych wyznaczono także *Parametr Dominacji Jądra* P_{CD} , który jest zdefiniowany, jako stosunek relatywistycznie wzmocnionego strumienia centrum obiektu S_{core} do strumienia struktur dyfuzyjnych S_{ext} :

$$P_{\text{CD}} = S_{\text{core}}/S_{\text{ext}}(1+z)^{\alpha_{\text{ext}}-\alpha_{\text{core}}},$$

gdzie α_{ext} i α_{core} to indeksy spektralne dla struktur rozciągniętych i zwartych, a z jest przesunięciem ku czerwieni dla danego źródła (na podstawie analiz z prac [53], [84] skorzystano z formuły zawartej w pracy [16]). Uzyskane dane zostały zawarte w tabeli 4.2, kolumny 1 oraz 2 zawierają nazwę instrumentu/ przeglądu oraz częstotliwość obserwacji, natomiast kolumna 3 zawiera logarytmiczne wartości P_{CD} . Wartości tego parametru – wyrażającego stopień zwartości źródła i będące wskaźnikiem nachylenia obiektu względem obserwatora – wyznaczono dla pomiarów na pięciu różnych częstotliwościach, przy czym w obliczeniach

Tabela 4.1: Pomiary strumienia w zakresie fal radiowych dla obiektu SBS B1646+499

Częstotliwość	Instrument/ przeгляд	Rozmiar wiązki	r.m.s.	$S_{\nu, peak}$	$S_{\nu, tot}$	Ref.
MHz		"	mJy/wiązka	mJy/wiązka	mJy	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
74	VLSSr	75×75	49.9	—	384 ± 60	[20] [†]
151	6C	270×270	brak danych	—	290 ± 48	[97] [‡]
153	TGSS ADR1	24.98×24.98	2.9	134 ± 7	245 ± 25	[49]
150	LOFAR	20×20	0.1	110 ± 6	747 ± 75	ta praca
150	GMRT	25.21×15.24	0.6	138 ± 7	338 ± 36	ta praca
325	GMRT	12.52×8.64	0.06	128 ± 6	376 ± 38	ta praca
327	WENSS	70.66×54	3.2	203 ± 11	259 ± 26	[94]
610	GMRT	6.72×4.69	0.2	122 ± 6	324 ± 32	[89]
1400	NVSS	45×45	0.4	165 ± 8	218 ± 22	[21]
1400	FIRST	5.4×5.4	0.1	108 ± 5	148 ± 15	[8] [*]
1425	VLA C	19.45×15.08	0.1	167 ± 8	219 ± 22	[89]
1430	VLA B	5.25×4.26	0.1	121 ± 6	163 ± 16	archiwalne dane VLA [*]
1450	VLA C	15.59×12.81	0.2	162 ± 8	197 ± 20	archiwalne dane VLA [*]
1510	VLA A	1.37×1.17	0.3	116 ± 6	136 ± 14	archiwalne dane VLA [*]
3000	JVLA D	25.24×22.34	0.03	73 ± 4	101 ± 12	ta praca
4845	VLBA	0.003×0.002	0.2	134 ± 7	154 ± 15	[45]
4850	PNM	223.65×194	4.9	—	181 ± 21	[42]
6000	JVLA C	5.44×4.02	0.2	58 ± 3	74 ± 9	ta praca
8338	VLBA	0.002×0.001	0.3	118 ± 6	133 ± 13	przeгляд CLASS
43300	VLA A	0.067×0.035	1.0	209 ± 10	228 ± 23	archiwalne dane VLA

[†] oryginalny strumień z przeгляdu VLSSr został przeskalowany przez czynnik 0.9, aby uzyskać zgodność ze skalą Baarsa [6]

[‡] oryginalny strumień z przeгляdu 6C został przeskalowany przez czynnik 0.83, aby uzyskać zgodność ze skalą Baarsa [6]

^{*} kalibracja i obrazowanie tych danych zostały wykonane przez autorkę rozprawy

uwzględnione zostało przesunięcie obiektu ku czerwieni (poprawka K^*).

Co ciekawe, otrzymane wartości nie są typowe dla blazarów skatalogowanych przez *Fermi-LAT*, których promieniowanie jest w większości zdominowane przez zwarte centra tych obiektów [16]. Jedyny wyjątek stanowi dosyć niska wartość $\log P_{\text{CD}}$ dla obserwacji GMRT na częstotliwości 150 MHz, w porównaniu do obserwacji LOFAR na tej samej długości fali, jednakże, jak zostało wcześniej wspomniane, w tym przypadku, rozciągnięta struktura ginie w szumie.

Tabela 4.2: Wartości parametru P_{CD} wyznaczone dla blazara SBS B1646+499.

Instrument/ przeгляд	Częstotliwość MHz	$\log P_{\text{CD}}$
(1)	(2)	(3)
LOFAR	150	-0.78 ± 0.07
GMRT	150	-0.18 ± 0.05
GMRT	325	-0.31 ± 0.03
WENSS	327	-0.38 ± 0.06
GMRT	610	-0.24 ± 0.06
NVSS	1400	-0.02 ± 0.03

Szerokopasmowe widmo blazara, zostało przedstawione w konwencji $\nu - \nu S_\nu$ i zawiera zarówno dane radiowe, jak i dostępne obserwacje na wyższych częstotliwościach. Należy zaznaczyć, iż tak jak w przypadku opisanego w podrozdz. 2.2 obiektu *AP Librae*, składowa widma pochodząca z procesu IC jest dosyć szeroka w porównaniu do części synchrotronowej, przy podobnej obserwowanej jasności obu źródeł. Strumień bolometryczny dla SBS B1646+499 wynosi $S_{\text{bol}} \sim 10^{-10} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ z jasnością izotropową równą:

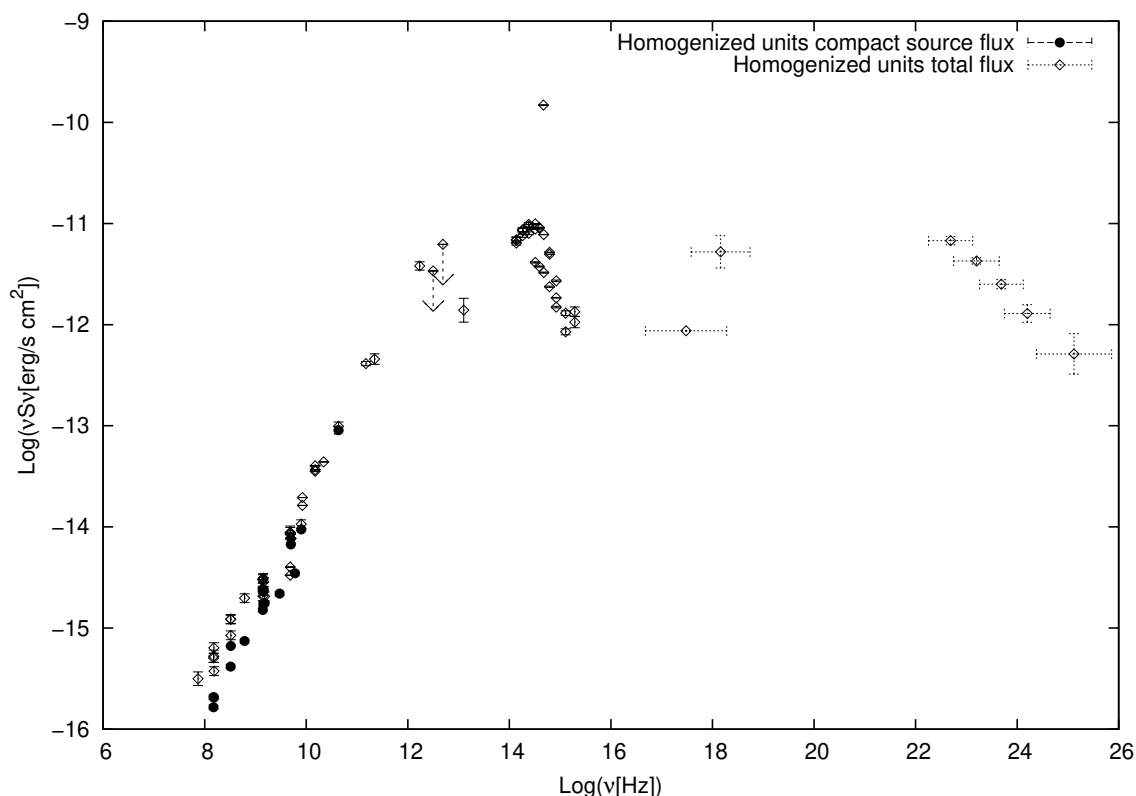
$$L_{\text{iso}} = 4\pi d_L^2 S_{\text{bol}} \sim 5 \times 10^{44} \text{ erg s}^{-1}.$$

*Poprawka ta uwzględnia przesunięcie widma obiektu w stronę części czerwonej wraz ze wzrastającą odległością źródła od obserwatora.

4.1.2 Emisja dżetu

Dżet jądrowy

W skali parseków, blazar posiada dżet jądrowy, rozciągający się w kierunku południowo-wschodnim na odległość sięgającą



Rysunek 4.2: Rozkład energii widmowej SBS B1646+499 w zakresie od radiowego do wysokich energii. Puste czworokąty oznaczają wartości strumienia scałkowanego (tab. 4.1, uzupełniona danymi archiwalnymi na wyższych częstotliwościach, zawartymi m. in. w bazie *NASA/IPAC Extragalactic Database*), czarne kropki odpowiadają natomiast wartościom maksymalnego strumienia dla wewnętrznej struktury źródła (strumień źródła punktowego).

100 mas[†] od jądra ([12] [13] [45] [67] [68]; prawy panel na rys. 3.1). Odpowiada to odległości około 94 pc. Co ciekawe, obserwacje radiowe z lat 1995 i 1997 (rys. 2 z pracy [12] oraz rys. 1

[†]milisekunda łuku, ang. *miliarcsecond*

z pracy [13]) ukazują zmiany strukturalne, które zaszły w dziecie na przełomie tych dwóch lat, w odległości 20 – 40 mas od radiowego jądra. Należy przy tym zaznaczyć, że średni poziom szumów na wymienionych mapach jest porównywalny i wynosi 0.09 mJy/wiązkę, przy rozmiarze wiązki 3.3×2.2 mas dla obserwacji z roku 1995 oraz 0.06 mJy/wiązkę, przy rozmiarze wiązki 2.8×1.7 mas w roku 1997. Brak uwidocznienia tych struktur/zgęstków na obserwacjach z lat 2006 i 2010 może zaś być spowodowany wyższym poziomem szumu na tych mapach.

Uwzględniając interwał czasu równy $\Delta\tau \sim 2.2$ lat, który upłynął pomiędzy dokonaniem tych dwóch obserwacji, wraz z dystansem na niebie (w projekcji) pokonanym przez te struktury wynoszącym $\Delta\ell \sim 9 - 18$ mas można dokonać oszacowania widomej prędkości zgęstków dżetu $\beta_{\text{app}} \sim \Delta\ell/\Delta\tau$, co zaś implikuje górny limit kąta nachylenia dżetu względem obserwatora:

$$\theta_{j,\text{max}} = 2 \arctan \beta_{\text{app}}^{-1} \sim 5^\circ - 10^\circ$$

i minimalną wartość współczynnika Lorentza:

$$\Gamma_{j,\text{min}} = (1 + \beta_{\text{app}}^2)^{1/2} \simeq \beta_{\text{app}} \sim 12 - 25.$$

Dla pełnego opisu, należy zaznaczyć, że każdorazowo zmierzono pozycje czoła zgęstka względem centrum obiektu, zakładając, że nowy komponent widoczny na mapie z 1997 roku wyłonił się ze struktury widocznej około 20 mas od centrum blazara w roku 1995.

Dżet wielkoskalowy

SBS B1646+499 posiada także dżet wielkoskalowy, rozciągający się w przybliżeniu na $33''$, co odpowiada odległości około 30 kpc (rys. 3.1 środkowy panel, 3.2 prawy panel, 3.5 środkowy panel). W odległości około 7 kpc od centrum dżet ten odchyła się o 22° w stosunku do pierwotnego kierunku propagacji –

zgodnego z obserwacjami VLBA na częstotliwości 5 GHz. Efekt ten może być jednak wzmocniony projekcją obrazu źródła na niebie oraz efektami relatywistycznymi. Na prawie wszystkich przedstawionych mapach dżet jest wyraźnie widoczny, a jego strumień całkowity S_j został przedstawiony w tab. 4.3 (kolumny 1–3 zawierają odpowiednio: nazwę instrumentu, częstotliwość obserwacji oraz wartość S_j).

Tabela 4.3: Wartości zintegrowanego strumienia dżetu wielkoskalowego wyznaczone dla blazara SBS B1646+499.

Instrument	Częstotliwość MHz	S_j mJy
(1)	(2)	(3)
LOFAR	150	153 ± 20
GMRT	150	122 ± 12
GMRT	325	89 ± 9
GMRT	610	70 ± 8
VLA	3000	10 ± 1

Biorąc pod uwagę fakt, iż na żadnej z tych map nie wykryto drugiego dżetu, można jedynie oszacować górny limit jego strumienia S_{cj} , któremu będzie odpowiadał trzykrotny średni poziom szumów na danej mapie. Następnie, zakładając że oba dżety są względem siebie symetryczne, a obserwowana asymetria w ich jasnościach $S_j/S_{cj} \simeq 117$ dla obserwacji na 610 MHz wynika z efektów relatywistycznych, można oszacować inklinację widocznego dżetu θ_j oraz prędkość plazmy β_j , korzystając z następujących formuł:

$$\beta_j \cos \theta_j = \frac{R - 1}{R + 1} \quad \text{gdzie} \quad R = \left(\frac{S_j}{S_{cj}} \right)^{1/(2-\alpha_j)},$$

przy czym α_j jest radiowym indeksem spektralnym ciągłego, równomiernego przepływu (jak np. w: [102] [117] [4]). Uwzględniając wartość $\alpha_j \simeq -0.88$ (podrozdz. 4.1.4) otrzymujemy ograniczenia na kąt widzenia $\theta_j < 50^\circ$ i prędkość plazmy $\beta_j \geq 0.7$,

a czynnik Lorentz’a dla przepływu plazmy kiloparsekowego dżetu wynosi:

$$\Gamma_j = (1 - \beta_j^2)^{-1/2} \geq 1.4.$$

Uzyskany limit dla β_j jest większy, niż średnie wartości prędkości plazmy wyznaczone dla kiloparsekowych dżetów z ich asymetrii w pracach [117] i [4]. Uwzględniając wartości S_j/S_{ej} dla obserwacji LOFAR, GMRT 325 MHz oraz JVLA 3 GHz, które wynoszą odpowiednio: 319, 494 i 111, wynik ten będzie konsekwentny (dla obserwacji na 3 GHz), bądź uzyskane zostaną jeszcze wyższe wartości ($\beta_j > 0.7$, $\Gamma_j > 1.4$; ze względu na jakość danych GMRT na 150 MHz wykluczono je z tej analizy).

4.1.3 Struktura rozciągła

Obserwacje GMRT na częstotliwości 610 MHz

Nowa mapa z obserwacji GMRT na częstotliwości 610 MHz potwierdziła obecność rozciąglej, dyfuzyjnej struktury naokoło blazara. Co więcej okazało się, iż jest ona zdecydowanie bardziej rozległa, niż ta widoczna na obserwacjach z przeglądu NVSS. Dodatkowo, jej morfologia przypomina raczej dwa ogromne płaty, niż okalające obiekt halo (rys. 3.2, lewy panel). Całkowity rozmiar płatów wynosi $\sim 12'$, co – uwzględniając przesunięcie blazara ku czerwieni – daje około 560 kpc, z obserwowanym stosunkiem wielkiej do małej osi płatów wynoszącym ~ 2 . Uwzględniając możliwą projekcję tej struktury na niebie, stosunek ten może być jednak znacznie większy, a takie wartości są typowe dla płatów radiogalaktyk (zobacz np. [71] [55]), jednak niespotykane wśród blazarów, dla których oczekuje się – jeżeli w ogóle – że emisja rozciągła przybierze kształt słabego sferycznego halo naokoło centralnego obiektu (zobacz np. [62] i rys. 2.4, 2.5 w tej pracy). Jako że blazary są ze swej definicji źródłami widocznymi pod niewielkim kątem z Ziemi, uwzględ-

niając kąt nachylenia obiektu względem obserwatora mniejszy niż 15° , rozmiar płatów SBS B1646+499 mógłby wynieść ponad 2 Mpc, co wydaje się mało prawdopodobne.

Całkowity strumień struktur widocznych na częstotliwości 610 MHz wynosi 324 ± 32 mJy, czemu odpowiada jasność radiowa $1.8 \times 10^{24} \text{ W Hz}^{-1}$. Północny płat jest silniejszy, a jego strumień na tej częstotliwości wynosi 38 ± 4 mJy. Słabszy, południowy płat posiada strumień równy 4 ± 0.4 mJy. Dla porównania, na mapie VLA uzyskanej z obserwacji archiwalnych na częstotliwości 1425 MHz zintegrowane strumienie dla płata północnego i południowego wynoszą odpowiednio 11 ± 1 mJy i 1.3 ± 0.1 mJy. Indeks spektralny tej struktury jest więc stromy ($\alpha < -1$), co jest w zgodzie z oczekiwaniami dla starzejącej się populacji elektronów w domniemanych pozostałościach po dawnej emisji radioźródła.

Zakładając, że nie ma znacznej projekcji płatów na niebie oraz uwzględniając wartość jasności radiowej zawartą w poprzednim akapicie, można wyznaczyć natężenie ekwipartycyjnego pola magnetycznego B_{eq} oraz minimalną energię całkowitą $W_{\text{tot, min}}$. Jeżeli przybliżymy płaty jako cylinder o wysokości 560 kpc i promieniu 155 kpc, jego objętość wyniesie $V_{\text{lobe}} \approx 10^{72} \text{ cm}^3$. Współczynnik wypełnienia płatów został zredukowany do jedności, założono, że relatywistyczne protony nie mają znaczącego wkładu w całość ciśnienia płatów, a przyjęta do obliczeń minimalna i maksymalna częstotliwość wynoszą: $\nu_{\text{min}} = 10 \text{ MHz}$, $\nu_{\text{max}} = 43 \text{ GHz}$ [7]. Stosując zatem formuły dla ekwipartycji energii (jak w [70]) uzyskano $B_{\text{eq}} \sim 1 \mu\text{G}$, $W_{\text{tot, min}} \sim 3 \times 10^{58}$ ergów.

Trzeba także zauważyć, że oś symetrii płatów z obserwacji GMRT 610 MHz i kąt pozycyjny jądrowego dżetu z obserwacji VLBA odchylają się o ponad 30° (widoczne jest to także

w przypadku pozostałych obserwacji, na których uwidoczniły się oba dyfuzyjne płaty blazara). Wykluczenie znacznej projekcji płatów, brak widocznego dżetu z przeciwnej strony obiektu, nadświatłne prędkości dżetu jądrowego oraz typowy dla blazarów rozkład energii implikują niewielki kąt widzenia dżetu względem obserwatora. Można więc stwierdzić, że odchylenie osi symetrii płatów i kierunku wypływu dżetu jest realne i nie stanowi np. wyniku projekcji obrazu źródła na niebie. Oś symetrii płatów oraz jądrowego dżetu zostały zaznaczone na lewym panelu rys. 3.2 kolejno czerwoną i niebieską linią.

Obserwacje GMRT na częstotliwości 325 MHz

Mapa źródła na częstotliwości 325 MHz widoczna jest na rys. 3.3, lewy panel. W tym przypadku można zauważyć, że nawet przy niewielkim rozmiarze wiązki (bez taperowania danych), dosyć szczegółowo uwidoczniona została morfologia rozciągniętych, lekko postrzępionych płatów, niemniej jednak widać artefakty od silnego centrum SBS B1646+499.

Strumień całkowity struktury wynosi na tej częstotliwości 376 ± 38 mJy. Centralna część blazara – radiowe jądro i dżet posiadają strumień kolejno 128 ± 6 mJy i 89 ± 9 mJy. Warto zwrócić uwagę, że nawet zachowując oryginalną wiązkę na mapie, widoczny jest płat południowy, co potwierdza wystramianie się widma struktur rozciągniętych ze spadkiem częstotliwości. Rys. 3.3, prawy panel, przedstawia mapę z uwzględnieniem jedynie krótkich baz z centralnej części interferometru GMRT (o średnicy około 1 km), gdzie południowa struktura dyfuzyjna została jeszcze lepiej uwidoczniona, utracono natomiast informacje o postrzępionym charakterze płatów.

Obserwacje LOFAR i GMRT na częstotliwości 150 MHz oraz ich porównanie

Finalne mapy z interferometru LOFAR są przedstawione na rys. 3.5. Strumień całkowity struktury wynosi 747 ± 75 mJy, a morfologia rozciągniętych płatów jest bardzo szczegółowa ze względu na zdolność rozdzielczą równą $20'' \times 20''$, przy średnim poziomie szumów wynoszącym 0.1 mJy/wiązkę (lewy panel). Dodatkowo, rozciągłość struktur dyfuzyjnych jest większa, niż dla obserwacji GMRT zarówno na częstotliwościach 325 MHz, jak i 610 MHz i wynosi około 15 minut łuku, co odpowiada aż 843 kpc.

Środkowy i prawy panel rys. 3.5 przedstawiają mapę blazara po wykonaniu kalibracji zależnej od kierunku (*LOFAR Factor Calibration*), a jej rezultat odbiega od wcześniejszych oczekiwań. Na mapie z panelu środkowego zostało przedstawione jedynie radiowe centrum obiektu, gdyż jak zostało wcześniej wspomniane, taka obróbka danych doprowadziła do utraty informacji na temat rozciągniętej emisji blazara, a wynikowa wiązka jest silnie eliptyczna i wynosi $13''.4 \times 4''.88$.

Panel prawy na rys. 3.5 przedstawia mapę całej struktury blazara, która została uwidoczniona dopiero po zastosowaniu *taperowania* danych. Stosując tą metodę, uzyskano wiązkę równą $32''.51 \times 25''.45$ i utracone zostały szczegóły ogromnych płatów SBS B1646+499.

Ze względu na złą jakość danych wynikającą z zakłóceń podczas powtarzanych dwa razy obserwacji, mapa GMRT na częstotliwości 150 MHz (rys. 3.4) nie wnosi zbyt wiele do analizy. Rozciągnięta struktura dyfuzyjna praktycznie nie została uwidoczniona. Podobnie jak w przypadku danych z przeglądu TGSS ADR1, widać jedynie centrum blazara: dżet oraz jądro. Średni poziom szumów na mapie z GMRT wynosi 0.6 mJy/wiązkę,

przy wiążce równej $25''.21 \times 15''.24$. Strumienie centralnego źródła punktowego na obu mapach są porównywalne, jeśli uwzględnić zmienność blazara (patrz tab. 4.1). Uwzględniając powyższe, można zdecydowanie uznać wyższość LOFARa nad tradycyjnym interferometrem GMRT podczas obserwacji na niskich częstotliwościach. Należy jednak odnotować, że wpływ na jakość danych mają także warunki atmosferyczne.

Obserwacje JVLA

Ze względu na krótki czas obserwacji na JVLA, nie było możliwe uzyskanie pełnego pokrycia płaszczyzny (u,v) , które dla JVLA wymaga 4 godzin syntezy apertury (patrz podrozdz. 3.3.1). W rezultacie dwuwymiarowa funkcja przenoszenia (ang. *Point Spread Function*) przypomina gwiazdę, co przełożyło się na struktury widoczne na obu uzyskanych mapach (rys. 3.9).

Dla osiągnięcia jak najlepszych rezultatów, finalna mapa w paśmie S została zobrazowana z użyciem polecenia *clean* w pakiecie CASA, z wykorzystaniem ważenia (danych z płaszczyzny (u,v)), które pozwala podkreślić struktury dyfuzyjne. Dodatkowo, odpowiednio dobierając obszary na mapie *brudnej*, najpierw wyczyszczone zostało zwarte, silne centrum źródła, następnie – kilka razy słabsza struktura rozciągała. Na mapie przedstawionej na lewym panelu rys. 3.9 widać strukturę dyfuzyjną, rozciągającą się na około $4'$ (~ 225 kpc), posiadającą strumień 18 ± 5 mJy, przy strumieniu całkowitej struktury obiektu wynoszącym 101 ± 12 mJy. Ze względu na wyższą obserwowaną częstotliwość (2–4 GHz), dla konfiguracji D osiągnięto lepszą zdolność rozdzielczą, niż w przypadku danych NVSS ($25''.24 \times 22''.34$ w porównaniu do $45'' \times 45''$), uwidocznione zostało więc zarówno zwarte, radiowe jądro blazara, jak i wielkoskalowy dżet, rozciągający się na odległość około $30''$ od centrum.

Są to pierwsze obserwacje na tak wysokich częstotliwościach, w których uwidoczniono okalającą blazara emisję rozciągłą, częściowo widoczne jest też jej połączenie z radiowym centrum. Szum na mapie wynosi 0.03 mJy/wiązkę , jest to ponad 10 razy mniej, niż w przypadku obserwacji z przeglądu NVSS.

Maksymalny strumień dla obserwacji w paśmie C wynosi z kolei 58 ± 3 , przy zdolności rozdzielczej równej $5''.44 \times 4''.02$ (rys. 3.9, prawy panel). Porównując rezultaty z obserwacji JVLA z danymi na niższych częstotliwościach nie zaobserwowano różnic w strukturze centralnej blazara.

4.1.4 Indeks spektralny

Do celów pracy wykonano pięć map indeksu spektralnego: dwie dla radiowego centrum z wielkoskalowym dżetem oraz trzy dla płatów, z wykorzystaniem obserwacji LOFAR, GMRT, i VLA.

Lewy panel rys. 4.3 przedstawia mapę wykonaną pomiędzy obserwacjami VLA (1425 MHz) i GMRT (610 MHz), z wykorzystaniem pakietu AIPS. Obie mapy zostały uprzednio sprawdzone do wspólnej geometrii i wiązki (która wyniosła $45'' \times 45''$). Ponadto, aby uniknąć błędów systematycznych, sprawdzono pozycje centrum SBS B1646+499 oraz kilku punktowych źródeł z pól na obu mapach (procedura ta została wykonana dla wszystkich map rozkładu indeksu spektralnego w pracy). Dane z obszarów, dla których strumień był niższy niż 3σ zostały wykluczone. Widmo jest strome, ze średnim indeksem równym -1.43 ± 0.28 . Należy jednak zaznaczyć, że bardzo strome obszary ($\alpha < -2$) na krańcu struktury mogą wynikać z problemu z interpolacją wartości widzialności dla struktur rozciągłych. Oznacza to, że wartości strumienia na krańcach struktury są niepewne, nawet pomimo wykluczenia danych poniżej wybranego poziomu obciążenia.

Wykorzystując jedynie długie bazy teleskopu GMRT zobrazony został dżet i radiowe centrum z wyłączeniem strumienia od struktur wielkoskalowych. Na podstawie takiej mapy oraz archiwalnych obserwacji z przeglądu VLA-FIRST wykonano mapę dla centrum blazara (prawy panel rys. 4.3). W tym przypadku, wynikowa wiązka wyniosła $7'' \times 7''$, a średni indeks spektralny dla radiowego jądra wynosi -0.16 ± 0.07 .

Dla kiloparsekowego dżetu, indeks spektralny wypłaszcza się od wartości -1.2 blisko centrum, do -0.25 przy brzegach, ze średnią wartością wynoszącą -0.88 ± 0.09 (prawy panel rys. 4.3). Widać także, że widmo jest zdecydowanie bardziej strome w okolicach osi dżetu, a bardziej płaskie na jego brzegach. Taka sama właściwość została zauważona dla blazara Mrk 501 przez Edwards'a i in. [27], jednak w zdecydowanie mniejszej skali – milisekund łuku.

Mapy indeksu spektralnego pomiędzy obserwacjami LOFAR (150 MHz), GMRT (610 MHz) i FIRST (1400 MHz) dla struktury całkowitej i centrum blazara zostały przedstawione na rys. 4.4. Wykonano je taką samą metodą, jak we wcześniejszym przypadku; aby zobrażować indeks spektralny centrum obiektu wykorzystano mapę z interferometru LOFAR po zastosowaniu metody kalibracji zależnej od kierunku (*LOFAR Facet Calibration*). Indeks spektralny dla płatów blazara zawiera się w przedziale od $\alpha \sim 0.0$ dla krańca płata południowego, gdzie widać strukturę w rodzaju tzw. *gorącej plamy*, charakterystyczną dla obiektów FR II, do $\alpha \sim -1.2$. Zobrazowany został znacznie większy obszar obu płatów, w tym – prawie w całości uwidoczniiony został płat południowy (lewy panel rys. 4.4). Okazało się także, że płat ten posiada obszar w kształcie pomostu o bardziej płaskim widmie ($\alpha \sim -0.3$), ulokowany w jego zachodniej części.

Konieczność wcześniejszej konwolucji danych dla radiowego centrum SBS B1646+499 do wiązki $14'' \times 14''$ (rys. 4.4, prawy panel) nie pozwala na rozróżnienie stratyfikacji wartości indeksu spektralnego wzdłuż i w poprzek dżetu, jednak jego wartości w przedziale $-0.5 < \alpha < -0.8$ pozostają w zgodzie z wcześniejszymi obserwacjami.

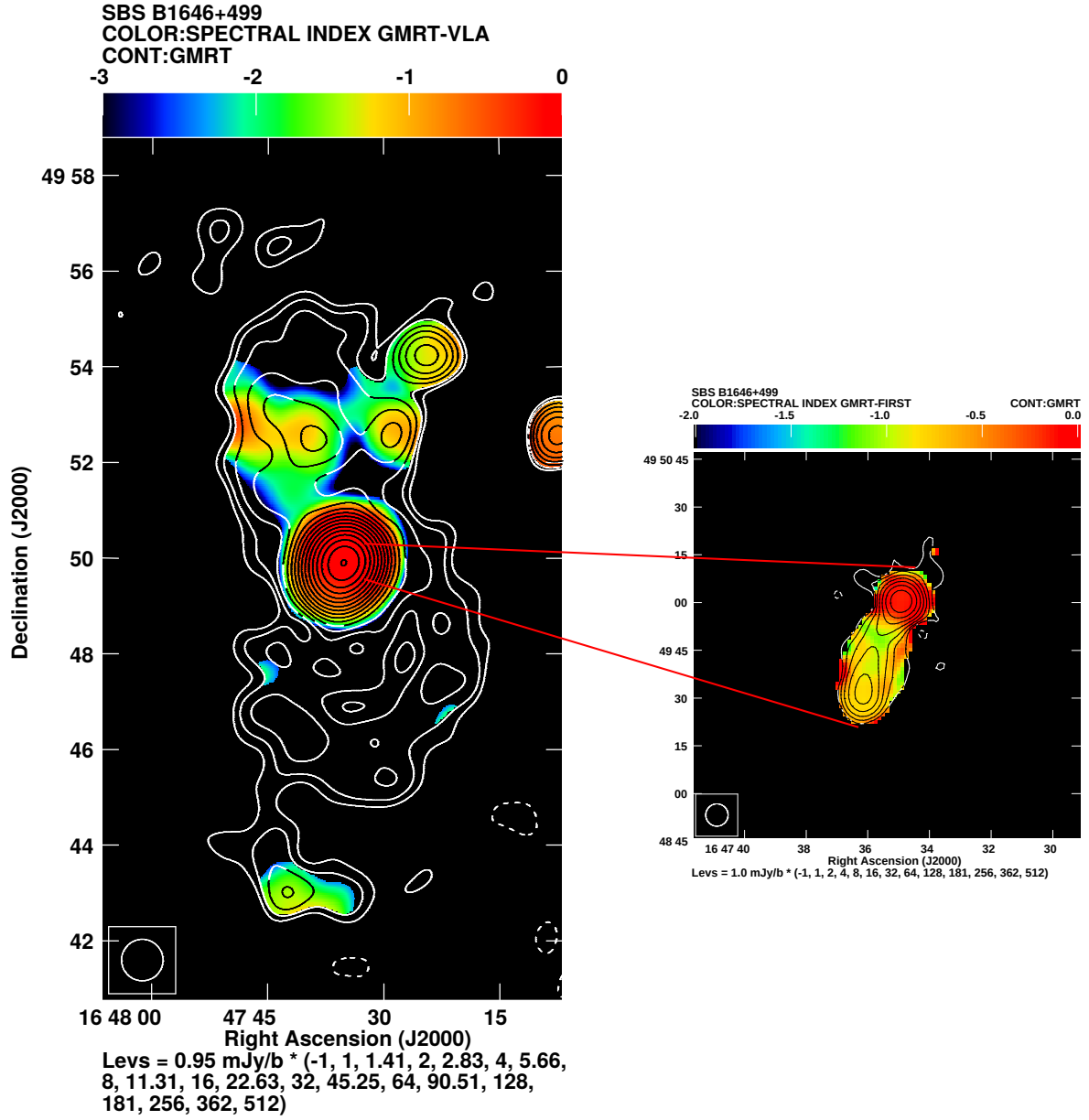
Rys. 4.5 przedstawia mapę rozkładu indeksu spektralnego pomiędzy obserwacjami radioteleskopem GMRT na częstotliwościach 325 i 610 MHz. Została ona wykonana dla potwierdzenia rozkładu współczynnika nachylenia widma pomiędzy obserwacjami instrumentami LOFAR (150 MHz) i GMRT (610 MHz), a jej rozdzielczość wynosi $45'' \times 45''$. Pomimo, że zobrazowany obszar jest mniejszy, niż w przypadku porównywanej z nią mapy i zachodnia część południowego płata nie jest dokładnie widoczna (strome widmo na krańcach struktury, podobnie jak w przypadku rys. 4.3 powinno być uznane za artefakt), widać fragment gorącej plamy z płaskim indeksem spektralnym.

Jedynie obserwacje innowacyjnym interferometrem LOFAR umożliwiły wykonanie mapy indeksu spektralnego z dobrą zdolnością rozdzielczą dla obu płatów blazara. Pozwoliło to na dokładną analizę struktury południowego płata, w tym odkrycie obszarów zawierających młodsze populacje elektronów.

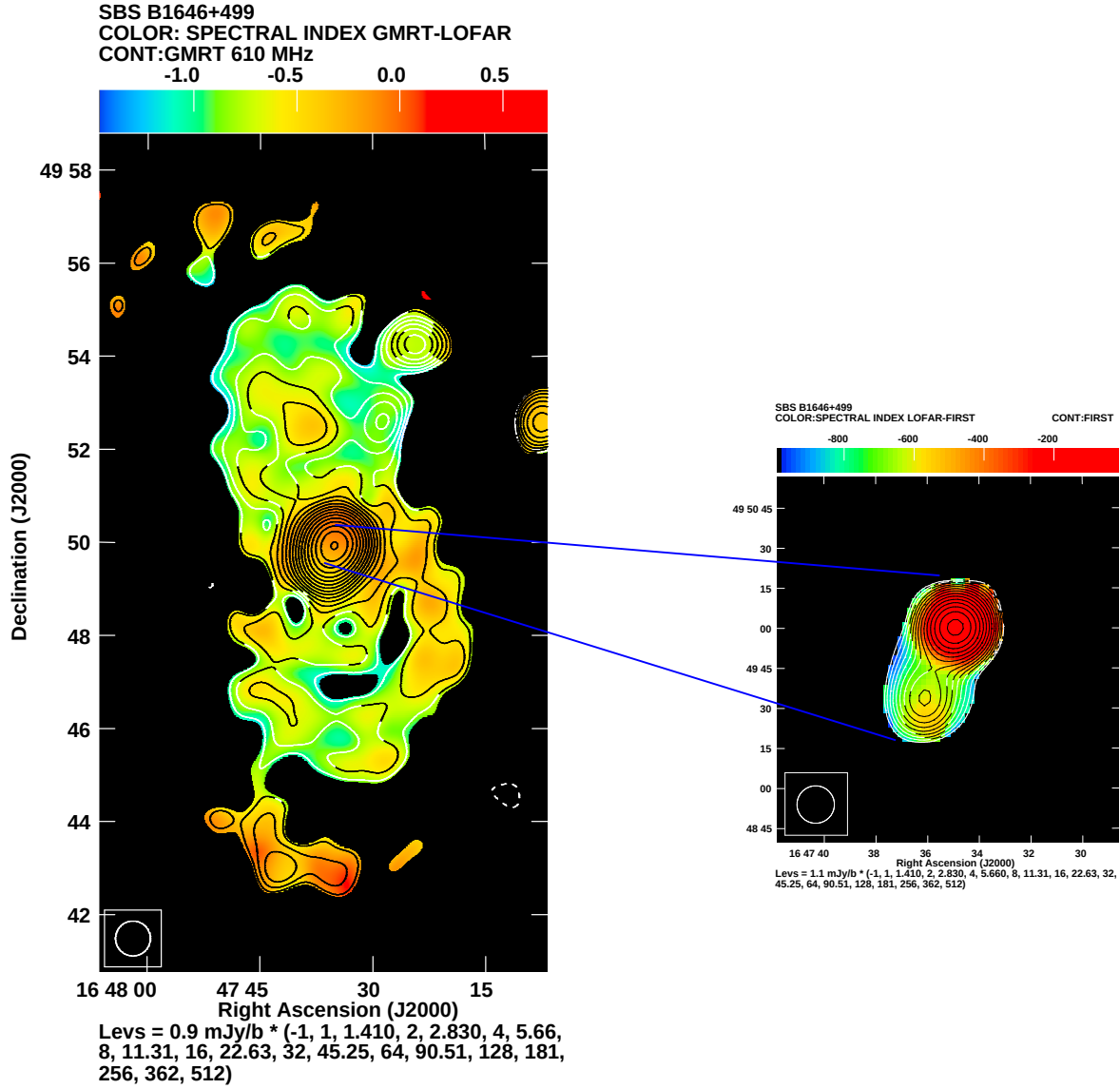
4.2 Wnioski i dyskusja

4.2.1 Hybrydowy blazar z burzliwą przeszłością: precesja osi dżetu

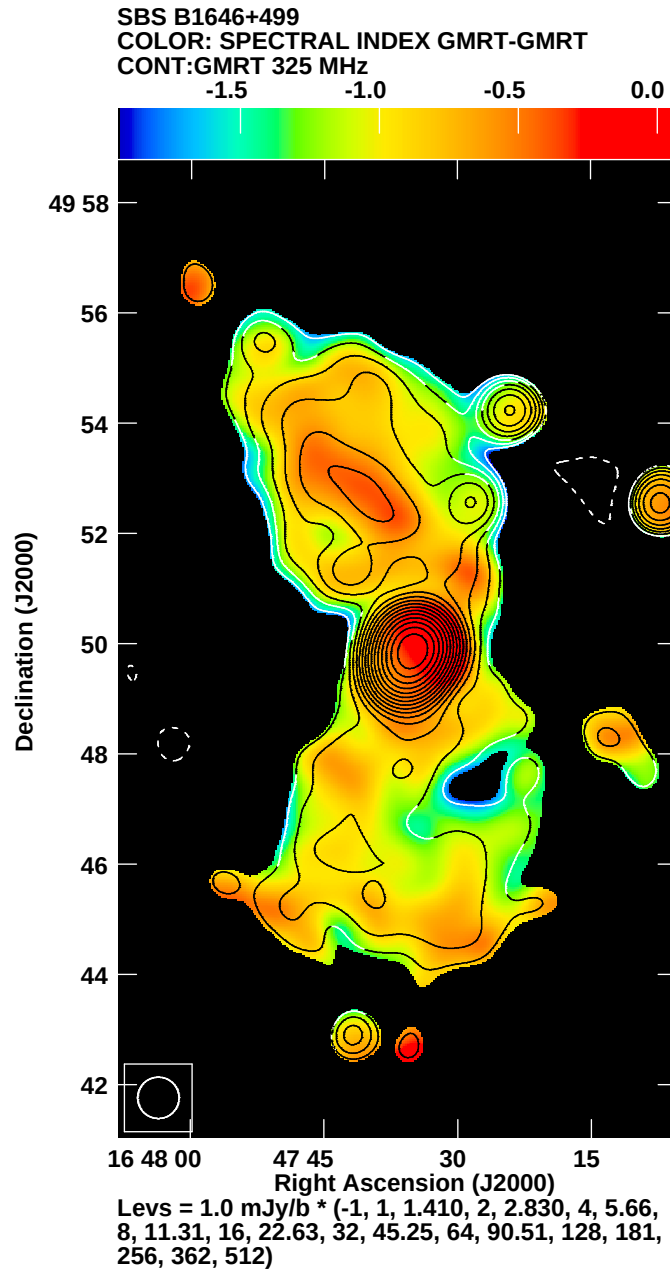
Obiekt SBS B1646+499 składa się z płatów osiągających niemal megaparsek długości, uwidocznionych w prawie wszystkich dedykowanych obserwacjach radiowych, krzywoliniowego dżetu rozciągającego się w skali kilkudziesięciu kiloparseków od centrum, cechującego się gradacją wartości indeksu spektralne-



Rysunek 4.3: Mapy indeksu spektralnego obiektu SBS B1646+499 wykonane pomiędzy obserwacjami GMRT (610 MHz) i VLA w paśmie L (~ 1400 MHz). *Lewy panel* przedstawia rozkład nachylenia widma dla struktury całkowitej blazara, z wiązką równą $45'' \times 45''$. *Prawy panel* zawiera mapę indeksu spektralnego radiowego centrum źródła wraz z krzywoliniowym dżetem, a wiązka wynosi $7'' \times 7''$.



Rysunek 4.4: Mapy indeksu spektralnego obiektu SBS B1646+499 wykonane pomiędzy obserwacjami LOFAR (150 MHz) i GMRT (610 MHz)/ FIRST (1400 MHz). *Lewy panel* przedstawia rozkład nachylenia widma dla struktury całkowitej blazara. *Prawy panel* zawiera mapę indeksu spektralnego radiowego centrum źródła wraz z krzywoliniowym dżetem. Rozmiary wiązek kolejno dla panelu lewego i prawego wynoszą: $45'' \times 45''$, $14'' \times 14''$.



Rysunek 4.5: Mapa indeksu spektralnego obiektu SBS B1646+499 wykonana pomiędzy obserwacjami GMRT na częstotliwościach 325 oraz 610 MHz. Przedstawiony został rozkład nachylenia widma dla struktury całkowitej obiektu, a rozmiar wiązki na tej mapie wynosi $45'' \times 45''$.

go wzdłuż i w poprzek kierunku propagacji, dżetu jądrowego o długości ponad 20 parseków oraz radiowego, zwartego centrum z płaskim widmem. Średni indeks spektralny zmierzony dla struktury rozciąglej implikuje starzenie się populacji elektronów wraz ze wzrastającą odległością od centrum blazara.

Sam obiekt powinien być rozważany jako hybryda pomiędzy FSRQ i lacertydami, a dopasowanie modelu do jego rozkładu energii spektralnej, podobnie jak w przypadku *AP Librae* może stanowić wyzwanie ze względu na konieczność odrzucenia standardowego modelu emisji blazarów [54] [47] [100] [121] [90] [92]. Z tego względu, blazar ten może stanowić interesujący cel do obserwacji w zakresie TeV przy wykorzystaniu teleskopów Cherenkova.

Jednostronność dżetu wielkoskalowego może zostać wytłumaczona efektem wzmocnienia relatywistycznego dla wysokiego współczynnika Lorentza ($\Gamma \geq 1.4$) w skalach kiloparsekowych i małego kąta nachylenia dżetu względem obserwatora. Niemniej jednak, brak dżetu w przeciwnym kierunku na wszystkich uzyskanych mapach jest problematyczny, uwzględniając gradację indeksu spektralnego. Kłopot stanowi bowiem zaobserwowane wypłaszczenie się widma na brzegach dżetu, które może być spowodowane przyśpieszaniem cząstek w turbulentnych warstwach relatywistycznego wypływu [85] [96] [99] [69]. Model takiego dżetu: ang. *spine-shear layer model* został opisany m. in. dla kiloparsekowego dżetu obiektu 3C 31 w pracy [61] i polega on na wystąpieniu różnic w prędkościach wypływu plazmy w osi dżetu oraz na jego brzegach, gdzie następuje interakcja z gęstym środowiskiem zewnętrznym. Wpływa to na kolimację wypływu, tym samym zmniejszając asymetrię jasności widomej dżetów z przeciwnych kierunków (zobacz np. [57] [61] [107]). Taki rodzaj wypływu widać także w pomiarach rozkła-

du polaryzacji liniowej i nachylenia pola magnetycznego, które na brzegach wypływu zostaje rozciągnięte i ułożone równoległe do kierunku propagacji dżetu, podczas gdy w obszarze osi dżetu pozostaje prostopadłe do wypływu (np. analiza [5] obiektu 1055+018).

Zastanawiający jest też brak widocznej gorącej plamy na krańcu dżetu po drugiej stronie. Prędkości w szoku terminalnym takiego wypływu powinny być jedynie subrelatywistyczne, nawet jeśli plazma propaguje się z prędkością ultrarelatywistyczną w zakresie spinu dżetu (zobacz np. [9]). Zatem, efekty wzmocnienia/osłabienia dla takich szoków są raczej zaniedbywalne. Można jednak wytłumaczyć brak gorącej plamy uwzględniając odkrycie gigantycznych płatów SBS B1646+499. W pracy [106] opisany został model restartującego dżetu dla obiektu 3C 273, zgodnie z którym nowy dżet propaguje się nie w niezakłóconym, stabilnym środowisku międzygalaktycznym, a w kokonie, wygenerowanym podczas poprzedniej aktywności źródła, tak więc prędkości dżetu mogą być co najmniej średniorelatywistyczne. Połączenie relatywistycznego wzmocnienia jasności widomej i efektów związanych z drogą przebytą przez światło może zatem sprawić, że gorąca plama pozostanie niewidoczna.

Nie do pominięcia jest także analogia SBS B1646+499 do radiogalaktyki *Centaurus A* ze względu na płaty oraz cykliczną aktywność dżetu (np. [80]). Bardzo podobna pod względem morfologicznym jest też radiogalaktyka opisana w pracy [51] – 4C 29.30, posiadająca bardzo podobne płaty rozciągające się na ~ 600 kpc ze stromym widmem (indeks spektralny ~ -1.3). Podobnie jak w przypadku blazara opisanego w tej pracy, stosunek wielkiej do małej osi płatów wynosi około 2. To podobieństwo potwierdza wniosek, że efekty projekcji w przypad-

ku płatów blazara SBS B1646+499 powinny zostać pominięte. Gruntowna różnica polega jednak na tym, że SBS B1646+499 jest blazarem, natomiast *Centaurus A* i 4C 29.30 – radiogalaktykami z silną absorpcją wokół zwartego jądra, sklasyfikowanymi jako *Seyfert II* (szczegółowe modelowanie widm w zakresie rentgenowskim obu tych źródeł zawarte jest w pracach [36] oraz [105]).

Blazarem z kolei jest wspomniany wcześniej w pracy obiekt 3C 371, który jest ułożony pod takim kątem względem ziemskiego obserwatora, pod którym widać zarówno rozciągłe halo, jak i dwa wewnętrzne płaty. Jeden z nich, ulokowany na południowy zachód od centrum posiada dżet oraz gorącą plamę, co sugeruje iż widzimy stosunkowo niedawną aktywność radiogalaktyki. Struktura źródła zobrazowana na mapach VLA nie przypomina współliniowej morfologii FR I (ani FR II), bowiem same płaty znajdują się w rozciąglonym halo, które okala jądro niemalże radialnie, a jego rozmiary przewyższają rozmiary płatów. W tym przypadku, wyjaśnienia należałoby szukać w historii źródła. Być może, podobnie jak w przypadku radioźródeł w kształcie *X* [64], widzimy tutaj dwie lub więcej faz aktywności. Najmłodszą fazę stanowiłyby płaty wraz z widocznymi dżetem i gorącą plamą, podczas gdy rozległe halo może być efektem poprzedniej emisji.

Nietypowa morfologia tych obiektów jest najprawdopodobniej spowodowana nagłą zmianą kierunku propagacji dżetu lub przemieszczeniem się materiału znajdującego się w już powstałych płatach w niejednorodnym ośrodku międzygalaktycznym (tzw. *backflow*; [81]). Uwzględniając kształt i widomy rozmiar płatów oraz odchylenie ich osi symetrii względem osi symetrii jądrowego dżetu można wywnioskować, że dżet SBS B1646+499 musiał zmienić kierunek swojej propagacji pomiędzy dwiema

fazami aktywności blazara.

Z kolei, na niejednorodny ośrodek międzygalaktyczny w pobliżu SBS B1646+499 wskazują wyniki nowych obserwacji blazara z wykorzystaniem radiointerferometru LOFAR. Nieznaczone zakrzywienie krańców obu płatów SBS B1646+499 w kierunku wschodnim jest zauważalne na lewym panelu rys. 3.5 oraz na rys. 3.3 ze względu na bardzo dobrą uzyskaną zdolność rozdzielczą. Nasuwa to analogię do źródeł typu *Wide-angle tail* (WAT) [87], których dżety i/lub płaty wykrzywione są w tym samym kierunku o niewielki kąt (pierwsza taka analiza dla obiektu WAT 3C 465 została zawarta w pracy [28]). Jako że sama prędkość własna takiego źródła nie jest w stanie spowodować wygięcia, za przyczynę takiej morfologii uznaje się złożenie ruchu własnego obiektu oraz oddziaływania płatów z bogatym środowiskiem zewnętrznym (międzygalaktycznym oraz pomiędzy gromadami galaktyk), którego ciśnienie wywierane na płaty wygina je przeciwnie do propagacji źródła (np. [72]). Z kolei uzyskany rozkład indeksu spektralnego dla struktury rozciąglej (lewy panel rys. 4.4) ukazał wspomniany wcześniej pomost o płaskim widmie w południowym płacie blazara, który mógł powstać na skutek przyspieszania starej populacji elektronów w szoku na styku płata ze środowiskiem zewnętrznym (analiza mapy indeksu spektralnego dla źródła WAT została zawarta np. w pracy [26]) i tym samym przeciwdziała to starzeniu się widma płata.

Analizując otrzymane obserwacje można także opisać bilans energetyczny źródła. Dla SBS B1646+499 izotropowa jasność bolometryczna wynosi $L_{\text{iso}} \sim 5 \times 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$, z kolei minimalny współczynnik Lorentza dla dżetu w skali subparsekowej $\Gamma_j \sim 20$. Pozwala to otrzymać całkowitą wyemitowaną moc jako $L_{\text{em}} \approx \Gamma_j^{-2} L_{\text{iso}}$ (np. [104]), z której można oszacować całkowitą

energię kinetyczną blazara:

$$L_j \approx \eta_j^{-1} L_{\text{em}} \approx \frac{L_{\text{iso}}}{\eta_j \Gamma_j^2} \sim 10^{43} - 10^{44} \text{ erg s}^{-1},$$

dla wydajności promieniowania jądra blazara przyjętej jako $\eta_j \sim 1\% - 10\%$ [40]. Przy założeniu ciągłego wypływu od skali subparsekowej do kiloparsekowej i przy braku znaczącej deceleracji, skala czasowa obecnie trwającej aktywności źródła może być przybliżona formułą:

$$\tau_j \approx \frac{\ell_j (1 - \beta \cos \theta_j)}{c \beta \sin \theta_j} < 1 \times 10^6 \text{ lat},$$

gdzie $\ell_j \sim 30 \text{ kpc}$ stanowi rozmiar liniowy dżetu w projekcji, a rozważane kąty widzenia względem obserwatora wynoszą od kilku do 50° , przy prędkości szoku terminalnego dżetu $\beta \gtrsim 0.7$.

Dolny limit dla całkowitej energii kinetycznej dżetu podczas poprzedniej epoki aktywności może zostać oszacowany z analizy struktury rozciągłej. Zakładając brak znaczącego ciśnienia hadronowego wewnątrz płatów, ekwipartycję energii pomiędzy polem magnetycznym płatów i promieniującymi elektronami oraz równoważące się ciśnienie halo i środowiska zewnętrznego, typowe dla późnych etapów propagowania się reliktowych struktur radiowych – energia całkowita może być obliczona, jako stosunek minimalnej entalpii płatów

$$\mathcal{H} = 4p_{\text{min}} V_{\text{lobe}} = \frac{4}{3} W_{\text{tot, min}} \sim 4 \times 10^{58} \text{ erg}$$

i ich czasu życia τ_{lobe} . Czas ten z kolei można wyznaczyć z formuły:

$$\tau_{\text{lobe}} \sim l_{\text{lobe}}/c_s \sim 5 \times 10^8 \text{ lat},$$

co stanowi skalę czasową ekspansji dźwięku, z uwzględnieniem równoważnego promienia halo $l_{\text{lobe}} \sim 200 \text{ kpc}$ i prędkości dźwięku w gazowym środowisku wynoszącej

$$c_s = 5 kT/3 m_p \sim 3.7 \times 10^7 \text{ cm s}^{-1}$$

(przy założeniu typowego środowiska grup galaktyk z temperaturą $T \sim 10^7 K$). Wyznaczona skala czasowa jest tożsama z wiekiem analogicznych, gigantycznych płatów oszacowanym dla radiogalaktyki 4C 29.30 w pracy Jamrozego i in. za pomocą datowania synchrotronowego [51]. Z powyższych otrzymujemy

$$L_{j, \min} \sim \mathcal{H}/\tau_{\text{lobe}} \sim 0.3 \times 10^{43} \text{ erg s}^{-1},$$

co z kolei jest konsystentne z oszacowaną energią kinetyczną dla aktualnej fazy aktywności źródła.

Trzeba jednak zaznaczyć, że ten dolny limit został wyznaczony przy założeniu minimalnego warunku ciśnienia w płatach, przy braku wkładu termicznej plazmy, czy relatywistycznych hadronów (zobacz [86] oraz [108] dla *Centaurusa A*). Można więc wysnuć wniosek iż energia kinetyczna dżetu podczas obecnej fazy aktywności blazara jest co do rzędu wielkości taka sama, jak podczas fazy poprzedniej. To z kolei dostarcza dolnego limitu dla tempa akrecji źródła:

$$\frac{\dot{M}_{\text{acc}}}{\dot{M}_{\text{Edd}}} \geq \eta_d \frac{L_j}{L_{\text{Edd}}} \sim 10^{-4},$$

ponieważ nawet z maksymalną wydajnością produkcji dżetu przez wirującą czarną dziurę z namagnetyzowanym dyskiem akrecyjnym, całkowita energia kinetyczna nie może przekroczyć kilkuset procent mocy akrecji $\dot{M}_{\text{acc}} c^2$ [110]. Tempo akrecji Eddingtona oraz jasność odpowiadają masie czarnej dziury $M_{\text{BH}} \sim 4 \times 10^8 M_{\odot}$ oszacowanej dla systemu z obserwacji galaktyki macierzystej w filtrze R [76] – założono tutaj typową wydajność promieniowania dysku akrecyjnego $\eta_d \sim 0.1$. Ponieważ SBS B1646+499 jest hybrydą, można oczekiwać, że jego tempo akrecji jest w rzeczywistości znacznie wyższe niż $10^{-4} \dot{M}_{\text{Edd}}$.

Wyjaśnieniem specyficznej morfologii blazara może więc być precesja osi dżetu, która uwzględniając powyższe obliczenia,

mogła nastąpić w czasie życia źródła. Konkretnym mechanizmem, który mógłby to spowodować jest *wleczenie układów Lense’a-Thirringa* [65], polegające na zmianie nachylenia osi symetrii spinu czarnej dziury względem dysku akrecyjnego. Zakładając maksymalną wartość spinu czarnej dziury i współczynnik lepkości $\alpha = 0.03$ otrzymujemy:

$$\tau_{align} \sim 5 \times 10^8 \text{ lat} \left(\frac{\dot{M}_{acc}}{10^{-4} \dot{M}_{Edd}} \right)^{-7/8},$$

spełniony jest więc warunek: $\tau_{align} < \tau_{lobe}$ [82]. Alternatywnie, nagłą reorientację osi dżetu mogłaby spowodować kolizja (ang. *merger*) supermasywnej czarnej dziury blazara z innym obiektem (jak w pracy [77]).

W przyszłości można zatem oczekiwać odkrycia źródeł o podobnej historii, jak niedawno odkryty obiekt PBC J2333.9–2343 opisany w pracy [46]. Badanie takich systemów może wnieść wiele do wiedzy na temat działania sprzężenia zwrotnego w galaktykach, gdyż dżety te mogą być bardziej efektywne w ogrzewaniu gorącego gazowego środowiska w grupach i gromadach galaktyk [19].

4.2.2 Niskoenergetyczna, dyfuzyjna emisja blazarów a model unifikacyjny galaktyk aktywnych

Powyższa analiza udowadnia, że dostępność wysokiej jakości danych obserwacyjnych – o dużej dynamice i czułości, z zachowaniem wystarczającej zdolności rozdzielczej – pozwala na prześledzenie przeszłych faz aktywności blazarów. Co więcej, można ją także rozpatrywać pod kątem szeroko pojętego schematu unifikacyjnego galaktyk aktywnych. Wydaje się bowiem zasadne wysnuć wniosek, że istnieją w tej grupie obiekty, takie jak SBS B1646+499, których nie można w pełni zakwalifikować do konkretnej klasy i podklasy AGNów, gdyż posiadają cechy

mieszane nie tylko w obrębie poszczególnych typów jednej klasy (w tym konkretnym przypadku: lacertydy i kwazary z płaskim widmem radiowym w obrębie klasy 0), ale także przeszły przez fazy aktywności pomiędzy różnymi klasami (od radiogalaktyki typu FR I/ FR II do blazara).

Osobną kwestią wartą podkreślenia jest holistyczne podejście do promieniowania blazarów na niskich częstotliwościach radiowych. O ile w modelowaniu widm tych obiektów uwzględnia się nietermiczną emisję z dżetu, odpowiedzialną za komponent synchrotronowy w widmie tych źródeł oraz emisję IC (ewentualnie także dodatkowe pola cząstek w modelach wielostrefowych, czy cząstki hadronowe), nie analizuje się dodatkowego składnika – emisji dyfuzyjnej. W niektórych przypadkach jest ona jednak czynnikiem decydującym o poprawnym dopasowaniu modelu teoretycznego do danych obserwacyjnych. Pomimo iż wydaje się to być sprawą trywialną – rozwiązanie to nie zostało wcześniej zaproponowane.

4.3 Podsumowanie

W powyższej rozprawie zebrane zostały dane na temat hybrydowego blazara SBS B1646+499 w wielu zakresach widma elektromagnetycznego. Analiza w paśmie radiowym została przeprowadzona na podstawie dedykowanych obserwacji na interferometrach GMRT, JVLA oraz LOFAR i uzupełniono ją o wszystkie dostępne dane archiwalne.

Najważniejszym rezultatem zawartym w pracy jest wyjaśnienie skomplikowanej morfologii i natury obiektu SBS B1646+499 w kontekście schematu unifikacyjnego galaktyk aktywnych. Dodatkowo, przeanalizowano przyczynę rozbieżności pomiędzy modelami emisji blazarów a danymi obserwacyjnymi dla niektórych z nich, co również nie zostało dotąd poruszone. Było to

możliwe jedynie dzięki wykonaniu obserwacji na niskich częstotliwościach radiowych, o dużej zdolności rozdzielczej, znacznej czułości i dynamice.

Podsumowując, główne rezultaty zawarte w pracy są następujące:

- dokonano wyczerpującego opisu obiektu należącego do grupy blazarów, cechujących się dyfuzyjną emisją radiową, z uwzględnieniem obserwacji o dużej dynamice, czułości i wysokiej rozdzielczości kątowej na niskich częstotliwościach radiowych,
- na podstawie analizy rozkładu energii spektralnej blazara SBS B1646+499, wyjaśniona została złożona natura widma obiektu na częstotliwościach radiowych, jako emisja trzech komponentów: stromego widma halo, rozciągniętego, kilo-parsekowego dżetu i jądra wykazującego samo-absorpcję,
- wyznaczono właściwości fizyczne blazara, takie jak energetyka dżetów oraz rozciągniętych płatów, indeks spektralny oraz natężenie pola magnetycznego; określono czas życia źródła i porównano energię obecnej i przeszłej fazy aktywności blazara,
- przyczyna skomplikowanej morfologii źródła opisana została jako możliwa precesja osi dżetu poprzez mechanizm *wleczenia układów Lense'a-Thirringa*, co poparto odpowiednimi obliczeniami,
- udowodniono, że niektóre obiekty tego typu nie mogą zostać sklasyfikowane w ramach jednej podklasy galaktyk aktywnych (zgodnie ze schematem unifikacyjnym AGNów), co więcej – w ciągu swojego istnienia przechodzą one także pomiędzy różnymi klasami tych źródeł,

- określono przyczynę rozbieżności pomiędzy modelami emisji blazarów a danymi obserwacyjnymi, jako brak uwzględnienia dodatkowej składowej tejże emisji – struktur dyfuzyjnych.

Dodatkowo, praca zawiera analizę jakości kalibracji i obrazowania map metodą *LOFAR Facet Calibration*, nawet chociaż spodziewany efekt kalibracji nie został osiągnięty. Lepsza zdolność rozdzielcza osiągnięta została w tym przypadku kosztem usunięcia danych z krótkich baz interferometru radiowego. Ze względu na niepewne rezultaty, skomplikowaną dla początkujących użytkowników obróbkę danych oraz czasochłonność tej metody, warto zastanowić się nad wykorzystaniem w tym celu innego oprogramowania, np. *killMS*, bądź też skupieniem się na jak najlepszym zaprojektowaniu obserwacji, tak aby kalibracja zależna od kierunku nie była niezbędna. Będzie to możliwe jedynie w przypadku dogodnej pozycji źródła na niebie podczas obserwacji (dużej wysokości górowania i możliwości wybrania odpowiedniego czasu obserwacji), relatywnie wysokiej jasności obiektu, przy braku słabych struktur rozciągniętych oraz odrobinie szczęścia, jeżeli chodzi o procentową utratę surowych danych interferometrycznych.

Niemniej jednak, autorka rozprawy ma świadomość, iż może spotkać się z zarzutem na temat braku analizy większej ilości źródeł tego typu. Trzeba jednak podkreślić, że do tej pory dane obserwacyjne na niskich, radiowych częstotliwościach, ze zdolnością rozdzielczą, czułością i dynamiką na tyle wysoką, aby zobrazować morfologię takiego obiektu z podziałem na poszczególne struktury zwarte i rozciągnięte praktycznie nie istniały. Przybliżona wiązka dla przeglądu nieba VLA na częstotliwości 74 MHz – VLSSr wynosi $75''$, z kolei TGSS ADR1, który posiada lepszą rozdzielczość ($\sim 25''$, jednak dla dwa razy wyż-

szej częstotliwości), jest niewystarczający do takiej analizy pod względem czułości. Zdolność rozdzielcza przeglądu północnego nieba WENSS na 327 MHz osiąga prawie (lub nawet więcej przy uwzględnieniu niskich deklinacji danego obiektu) 54'', podobnie – zdolności rozdzielcze danych z katalogów Cambridge liczone są w minutach łuku.

Dopiero uruchomienie LOFARa otworzyło nowe możliwości obserwacyjne na długich falach, jednak ze względu na fakt, iż intensywnie prowadzi się tym instrumentem przeglądy całego nieba, a dostępny czas obserwacyjny podzielony jest w zależności od wkładu danego kraju w całe konsorcjum oraz, że późniejsza obróbka danych wymaga dostępu do superkomputerów i dużej ilości czasu obliczeniowego – otrzymanie czasu obserwacyjnego na większą grupę obiektów jest zdecydowanie utrudnione. Co więcej, późniejsza obróbka takich danych nie jest trywialna, a oprogramowanie cały czas podlega zmianom, poprawiane i opracowywane są też inne, nowe metody kalibracji danych. Niemniej jednak, badania na temat dyfuzyjnej emisji blazarów będzie można szybko uaktualnić o kolejne obiekty po publicznym udostępnieniu m. in. przeglądu nieba wykonanego LOFARem na częstotliwości 150 MHz.

Powyższa rozprawa na temat SBS B1646+499 potwierdza fakt, iż takie rozciągle struktury naokoło blazarów istnieją, wypełniają je populacje starzejących się elektronów i należy brać je pod uwagę przy modelowaniu emisji z galaktyk aktywnych tego typu. Niekoniecznie są też one wynikiem jedynie efektu projekcji płata widzianego od czoła. Co więcej, mając odpowiednie dane, można odpowiedzieć na pytanie o historię aktywności źródła, która w tym przypadku uwzględnia przejście z jednej do drugiej klasy aktywnych galaktyk. Bez takiej analizy nasz obraz blazarów, w tym ich klasyfikacja i unifikacja, są

niekompletne.

Bibliografia

- [1] Abramowski, A., Aharonian, F., Ait Benkhali, F. i in. 2015, A&A, 573, A31
- [2] Acero, F., Ackermann, M., Ajello, M. i in. 2015, ApJSS, 218, 23
- [3] Antonucci, R. R. J. i Ulvestad, J. S. 1985, ApJ, 294, 158
- [4] Arshakian, T. G. i Longair, M. S. 2004, MNRAS, 351, 727
- [5] Attridge, J. M., Roberts, D. H. i Wardle, J. F. C. 1999, ApJ, 518, L87
- [6] Baars, J. W. M., Genzel, R., Pauliny-Toth, I. I. K. i Witzel, A. 1977, A&A, 61, 99
- [7] Beck, R. i Krause, M. 2005, Astronomische Nachrichten, 326, 414
- [8] Becker, R. H., White, R. L. i Helfand, D. J. 1995, ApJ, 450, 559
- [9] Begelman, M. C. i Cioffi, D. F. 1989, ApJ, 345, L21
- [10] Bennett, C. L., Larson, D., Weiland, J. L. i Hinshaw, G. 2014, ApJ, 794, 135
- [11] Blasi, M. G., Lico, R., Giroletti, M. i in. 2013, A&A, 559, A75

- [12] Bondi, M., Marchã, M. J. M., Dallacasa, D. i Stanghellini, C. 2001, MNRAS, 325, 1109
- [13] Bondi, M., Marchã, M. J. M., Polatidis, A. i in. 2004, MNRAS, 352, 112
- [14] Caccianiga, A., Marchã, M. J., Antón, S., Mack, K.-H. i Neeser, M. J. 2002, MNRAS, 329, 877
- [15] Cassaro, P., Stanghellini, C., Bondi, M. i in. 1999, A&AS, 139, 601
- [16] Chen, Y. Y., Zhang, X., Zhang, H. J. i Yu, X. L. 2015, MNRAS, 451, 4193
- [17] Chengalur J., 2013, NCRA-TIFR Technical Report, NCRA/COM/001
- [18] Chiaberge, M., Celotti, A., Capetti, A. i Ghisellini, G. 2000, A&A, 358, 104
- [19] Cielo, S., Babul, A., Antonuccio-Delogu, V., Silk, J. i Volonteri, M. 2018, A&A, 617, A58
- [20] Cohen, A. S., Lane, W. M., Cotton, W. D. i in. 2007, AJ, 134, 1245
- [21] Condon, J. J., Cotton, W. D., Greisen, E. W. i in. 1998, AJ, 115, 1693
- [22] Conway, R. G. i Stannard, D. 1972, MNRAS, 160, 31P
- [23] de Vaucouleurs, G., de Vaucouleurs, A., Corwin Jr., H.G. i in. 1991 *Third Reference Catalogue Of Bright Galaxies*, wersja 3.9
- [24] de Vos, M., Gunst, A. W. i Nijboer, R. 2009, IEEE Proceedings, 97, 1431

- [25] Dermer, C. D. 2008, *Mem. S.A.It.*, wol. 1
- [26] Douglass, E. M., Blanton, E. L., Clarke, T. E., Randall, S. W. i Wing, J. D. 2011, *ApJ*, 743
- [27] Edwards, P. G., Giovannini, G., Cotton, W. D. i in. 2000, *PASJ*, 52, 1015
- [28] Eilek, J.A., Burns, J.O., O'Dea, C.P. i Owen, F.N. 1984, *ApJ*, 278, 37
- [29] Ekers, R. D., Wall, J. V., Shaver, P. A. i in. 1989, *MNRAS*, 236, 737
- [30] Falcke, H. D. E. 2006, w *IAU Joint Discussion*, wol. 12, *IAU Joint Discussion*
- [31] Falcke, H. D., van Haarlem, M. P., de Bruyn, A. G. i in. 2007, *Highlights of Astronomy*, 14, 386
- [32] Falco, E. E., Kochanek, C. S. i Muñoz, J. A. 1998, *ApJ*, 494, 47
- [33] Falomo, R., Kotilainen, J., K., Carangelo, N. i Treves, A. 2003, *ApJ*, 595, 624
- [34] Fanaroff, B. L. i Riley, J. M. 1974, *MNRAS*, 167, 31P
- [35] Fanti, R., Gioia, I., Lari, C. i Ulrich, M. H. 1978, *A&AS*, 34, 341
- [36] Fukazawa, Y., Hiragi, K., Yamazaki, S. i in. 2011, *ApJ*, 743, 124
- [37] Georganopoulos, M. i Kazanas, D. 2003, *ApJ*, 594, L27
- [38] Ghisellini, G. i Celotti, A. 2001, *A&A*, 379, L1
- [39] Ghisellini, G., Tavecchio, F., Foschini, L. i Ghirlanda, G., 2011 *MNRAS* 414, 2674

- [40] Ghisellini, G., Tavecchio, F., Maraschi, L., Celotti, A. i Sbarrato, T. 2014, *Nature*, 515, 376
- [41] Gómez, J.-L. i Marscher, A., P. 2000, *ApJ*, 530, 245
- [42] Gregory, P. C. i Condon, J. J. 1991, *ApJS*, 75, 1011
- [43] Gupta Y., Ajithkumar B., Kale H. i in. 2017, *Current Science*, wol. 113, nr 4, 707
- [44] Healey, S. E., Romani, R. W., Taylor, G. B. i in. 2007, *ApJS*, 171, 61
- [45] Helmboldt, J. F., Taylor, G. B., Tremblay, S. i in. 2007, *ApJ*, 658, 203
- [46] Hernández-García, L., Panessa, F., Giroletti, M. i in. 2017, *A&A*, 603, A131
- [47] Hervet, O., Boisson, C. i Sol, H. 2015, *A&A*, 578, A69
- [48] Hurley-Walker, N., Callingham, J. R., Hancock, P. J., Franzen, T. M. O. i Hindson, L. 2017, *MNRAS*, wol. 464, 1146
- [49] Intema, H. T., Jagannathan, P., Mooley, K. P. i Frail, D. A. 2017, *A&A*, 598, A78
- [50] Jackson, N. i Marcha, M. 1999, *MNRAS*, 309, 153
- [51] Jamrozy, M., Konar, C., Saikia, D. J. i in. 2007, *MNRAS*, 378, 581
- [52] Jansky, K., G. 1933, *Nature*, 132, 66
- [53] Kapahi, V. K. i Saikia, D. J. 1982, *JA&A*, 3, 465
- [54] Kaufmann, S., Wagner, S. J. i Tibolla, O. 2013, *ApJ*, 776, 68

- [55] Kharb, P., Lister, M. L. i Cooper, N. J. 2010, ApJ, 710, 764
- [56] Kollgaard, R. I., Wardle, J. F. C., Roberts, D. H. i Gabuzda, D. C. 1992, AJ, 104, 1687
- [57] Komissarov, S. S. 1990, Soviet Astronomy Letters, 16, 284
- [58] Königl, A. 1981, ApJ, 243, 700
- [59] Kraus, J. D. 2004, *Radio Astronomy, 2nd Ed.*, Cygnus-Quasar Books
- [60] Laing, R. A., Riley, J. M. i Longair, M. S. 1983, MNRAS, 204, 151
- [61] Laing, R. A., Parma, P., de Ruiter, H. R. i Fanti, R. 1999, MNRAS, 306, 513
- [62] Laurent-Muehleisen, S. A., Kollgaard, R. I., Moellenbrock, G. A. i Feigelson, E. D. 1993, AJ, 106, 875
- [63] Law, N. M., Kulkarni, S. R., Dekany, R. G. i in. 2009, PASP, 121, 1395
- [64] Leahy, J. P. i Parma, P. 1992, Proc. 7th. I.A.P. Meeting: *Extragalactic Radio Sources. From Beams to Jets*, 307
- [65] Lense, J. i Thirring, H. 1918, Phys. Z. 19, 156
- [66] Levine, A. M., Lang, F. L., Lewin, W. H. G. i in. 1984, ApJS, 54, 581
- [67] Linford, J. D., Taylor, G. B., Romani, R. W. i in. 2011, ApJ, 726, 16
- [68] Linford, J. D., Taylor, G. B., Romani, R. W. i in. 2012, ApJ, 744, 177

- [69] Liu, R.-Y., Rieger, F. M. i Aharonian, F. A. 2017, *ApJ*, 842, 39
- [70] Longair, M. S. 2011, *High Energy Astrophysics*, Cambridge University Press, wyd. 3
- [71] Machalski, J., Jamrozy, M. i Saikia, D. J. 2009, *MNRAS*, 395, 812
- [72] Mao, M. Y., Johnston-Hollitt, M., Stevens, J. B i Wotherpoon, S. J. 2009, *MNRAS*, 392, 1070
- [73] Marcha, M. J. M., Browne, I. W. A., Impey, C. D. i Smith, P. S. 1996, *MNRAS*, 281, 425
- [74] Massaro, E., Giommi, P., Leto, C. i in. 2009, *A&A*, 495, 691
- [75] Massaro, F., Thompson, D. J. i Ferrara, E. C. 2015, *A&A Rev.*, 24, 2
- [76] McLure, R. J. i Dunlop, J. S. 2001, *MNRAS*, 327, 199
- [77] Merritt, D. i Ekers, R. D. 2002, *Science*, 297, 1310
- [78] Miller, J. S. 1975, *ApJ*, 200, L55
- [79] Morganti, R., Killeen, N. E. B. i Tadhunter, C. N. 1993, *MNRAS*, 263, 1023
- [80] Morganti, R., Killeen, N. E. B., Ekers, R. D. i Oosterloo, T. A. 1999, *MNRAS*, 307, 750
- [81] Murgia, M. 2001, *A&A*, 380, 102
- [82] Natarajan, P. i Pringle, J. E. 1998, *ApJ*, 506, L97

- [83] Okabe, A., Boots, B., Sugihara, K. i Chiu, S. 2000, *Spatial tessellations. Concepts and Applications of Voronoi Diagrams: Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics*, wydanie 2
- [84] Orr, M. J. L. i Browne, I.W. A. 1982, MNRAS, 200, 1067
- [85] Ostrowski, M. 2000, MNRAS, 312, 579
- [86] O’Sullivan, S. P., Feain, I. J., McClure-Griffiths, N. M. i in. 2013, ApJ, 764, 162
- [87] Owen, F. N. i Rudnick, L. 1976, ApJ, 205, L1-L4
- [88] Padovani, P. 1999, Italian Physical Society Conference Proceedings, wol. 65, 159
- [89] Pajdosz-Śmierciak, U., Jamrozy, M., Soida, M. i Stawarz, Ł. 2018, ApJ, 868, 1
- [90] Petropoulou, M., Vasilopoulos, G. i Giannios, D. 2017, MNRAS, 464, 2213
- [91] Prasad, J. i Chengalur, J. 2012, Experimental Astronomy, 33, 157
- [92] Pratim Basumallick, P. i Gupta, N. 2017, ApJ, 844, 58
- [93] Rau, A., Kulkarni, S. R., Law, N. M. i in. 2009, PASP, 121, 1334
- [94] Rengelink, R. B., Tang, Y., de Bruyn, A. G. i in. 1997, A&AS, 124, 259
- [95] Richards, J. L., Max-Moerbeck, W., Pavlidou, V. i in. 2011, ApJS, 194, 29
- [96] Rieger, F. M. i Duffy, P. 2004, ApJ, 617, 155

- [97] Roger, R. S., Costain, C. H. i Bridle, A. H. 1973, AJ, 78, 1030
- [98] Rybka, E. 1983, *Astronomia Ogólna*, PWN, wyd. VII poprawione i uzupełnione
- [99] Sahayanathan, S. 2009, MNRAS, 398, L49
- [100] Sanchez, D. A., Giebels, B., Fortin, P. i in. 2015, MNRAS, 454, 3229
- [101] Sandage, A. 1967, ApJ, 150, L177
- [102] Scheuer, P. A. G. i Readhead, A. C. S. 1979, Nature, 277, 182
- [103] Shen, Zhi-Qiang, Lo, K. Y., Liang, M.-C., Ho, Paul T. P. i Zhao, J.-H. 2005, Nature, 438, 62
- [104] Sikora, M., Madejski, G., Moderski, R. i Poutanen, J. 1997, ApJ, 484, 108
- [105] Sobolewska, M. A., Siemiginowska, A., Migliori, G. i in. 2012, ApJ, 758, 90
- [106] Stawarz, Ł. 2004, ApJ, 613, 119
- [107] Stawarz, Ł. i Ostrowski, M. 2002, ApJ, 578, 763
- [108] Stawarz, Ł., Tanaka, Y. T., Madejski, G. i in. 2013, ApJ, 766, 48
- [109] Stickel, M., Padovani, P., Urry, C. M., Fried, J. W. i Kuehr, H. 1991, ApJ, 374, 431
- [110] Tchekhovskoy, A., Narayan, R. i McKinney, J. C. 2011, MNRAS, 418, L79
- [111] Ulrich, M. H. 1989, *BL Lac Objects*, 334, 45

- [112] Urry, C. M. i Padovani, P. 1995, *PASP*, 107, 803
- [113] Urry, C. M. 2004, *ASP Conference Series*, wol. 311
- [114] van Haarlem, M. P., Wise, M. W., Gunst, A. W. i in. 2013, *A&A*, 556, A2
- [115] Vermeulen, R. C., Ogle, P. M., Tran, H. D. i in. 1995, *ApJ*, 452, L5
- [116] van Weeren, R. J., Williams, W. L., Hardcastle, M. J. i in. 2016, *ApJS*, wol. 223, 1
- [117] Wardle, J. F. C. i Aaron, S. E. 1997, *MNRAS*, 286, 425
- [118] Warwick, R. S., Saxton, R. D. i Read, A. M. 2012, *A&A*, 548, A99
- [119] Wright, E. L., Eisenhardt, P. R. M., Mainzer, A. K. i in. 2010, *AJ*, 140, 1868
- [120] Wrobel, J., M. i Lind, K., R. 1990, *ApJ*, 348, 135
- [121] Zacharias, M. i Wagner, S. J. 2016, *A&A*, 588, A110
- [122] Zech, A., Cerruti, M. i Mazin, D. 2017, *A&A*, 602, A25
- [123] Xu, Y.-D., Cao, X. i Wu, Q. 2009, *ApJ*, 694, L107

Spis rysunków

2.1	Schemat unifikacyjny galaktyk aktywnych	16
2.2	Wieloczęstotliwościowe widmo blazara Mrk 421 . . .	20
2.3	3C 371: struktura wewnętrzna	24
2.4	3C 371, Mrk 421 i Mrk 180: emisja rozciągła (NVSS, WENSS)	25
2.5	3C 371, Mrk 421 i Mrk 180: emisja rozciągła (VLA) .	26
3.1	SBS B1646+499: obserwacje NVSS, FIRST i VLBA .	34
3.2	SBS B1646+499: obserwacje GMRT 610 MHz	37
3.3	SBS B1646+499: obserwacje GMRT 325 MHz	39
3.4	SBS B1646+499: obserwacje GMRT 150 MHz	40
3.5	SBS B1646+499: obserwacje LOFAR 150 MHz	43
3.6	LOFAR Facet Calibration: pole kalibracyjne	45
3.7	Przykładowy rezultat kalibracji zależnej od kierunku	48
3.8	Przykładowy rezultat kalibracji zależnej od kierunku	49
3.9	SBS B1646+499: obserwacje JVLA w pasmach S i C	50
3.10	Diagram kolor-kolor	51
3.11	Niskoenergetyczna część widma blazara 3C 371 . . .	58
3.12	Niskoenergetyczna część widma blazara Mrk 421 . .	59
3.13	Niskoenergetyczna część widma blazara SBS B1646+499	60
4.1	Radiowe widmo SBS B1646+499	62
4.2	Rozkład energii widmowej SBS B1646+499	66
4.3	1646+499: indeks spektralny 610 MHz–pasmo L . . .	77
4.4	1646+499: indeks spektralny 150–610/1400 MHz . .	78

4.5 1646+499: indeks spektralny 610–325 MHz	79
---	----

Spis tabel

3.1	SBS B1646+499: archiwalne dane radiowe	35
3.2	Pomiary strumienia SBS B1646+499 w IR, promieniowaniu X i promieniowaniu gamma	53
3.3	3C 371, Mrk 421, SBS 1646+499: dane pomiarowe . .	57
4.1	Pomiary strumienia radiowego dla SBS B1646+499 .	64
4.2	SBS B1646+499: parametr dominacji jądra	65
4.3	SBS B1646+499: strumień dżetu wielkoskalowego . .	68