

## Załącznik 2.

### Autoreferat

**1. Imię i Nazwisko:** Marek Jamrozy

**2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe:**

- 2002 doktor nauk fizycznych, Wydział Matematyki, Fizyki i Informatyki, Uniwersytet Jagielloński, Kraków,  
rozprawa doktorska: *Observational constraints on cosmological evolution of dual-population radio sources*
- 1996 magister, specjalność - astronomia, Wydział Matematyki i Fizyki, Uniwersytet Jagielloński, Kraków,  
praca magisterska: *Cosmological evolution of radio sources at high redshifts*

**3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych:**

- od 2004 asystent, od października 2006 roku adiunkt, Obserwatorium Astronomiczne, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Jagielloński, Kraków
- 2002 - 2004 staż podoktorski w Radio Astronomical Institute, University of Bonn, Niemcy
- 1997 - 2002 studia doktoranckie Wydział Matematyki i Fizyki, Uniwersytet Jagielloński, Kraków
- 1996 - 1997 staż, Obserwatorium Astronomiczne, Wydział Matematyki i Fizyki, Uniwersytet Jagielloński, Kraków

**4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):**

**4a. Tytuł osiągnięcia naukowego:**

*Wieloczęstotliwościowe badania rozległych radiogalaktyk z wielokrotną aktywnością dżetową.*

**4b. Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego:**

- H1. Machalski, J., Jamrozy, M., Zoła, S., Koziół, D.,  
*The new sample of giant radio sources. II. Update of optical counterparts, further spectroscopy of identified faint host galaxies, high-frequency radio maps, and polarisation properties of the sources,*  
2006, *Astron. Astrophys.*, 454, 85
- H2. Jamrozy, M., Machalski, J., Mack, K.-H., Klein, U.,  
*Ageing analysis of the giant radio galaxy J1343+3758,*

2005, *Astron. Astrophys.*, 433, 467

H3. Jamrozy, M., Konar, C., Machalski, J., Saikia, D.J.,  
*A multifrequency study of giant radio sources - II. Spectral ageing analysis of the lobes of selected sources*,  
2008, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 385, 1286

H4. Machalski, J., Jamrozy, M., Saikia, D.J.,  
*A multifrequency study of giant radio sources - III. Dynamical age versus spectral age of the lobes of selected sources*,  
2009, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 395, 812

H5. Machalski, J., Jamrozy, M.,  
*The new sample of giant radio sources. III. Statistical trends and correlations*,  
2006, *Astron. Astrophys.*, 454, 95

H6. Machalski, J., Jamrozy, M., Konar, C.,  
*Spectral ageing analysis and dynamical analysis of the double-double radio galaxy J1548-3216*,  
2010, *Astron. Astrophys.*, 510, 84

H7. Jamrozy, M., Konar, C., Saikia, D.J., Stawarz, Ł., Mack, K.-H., Siemiginowska, A.,  
*Intermittent jet activity in the radio galaxy 4C29.30?*,  
2007, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 378, 581

H8. Jamrozy, M., Saikia, D.J., Konar, C.,  
*4C02.27: a quasar with episodic activity?*,  
2009, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 399, L141

H9. Machalski, J., Jamrozy, M., Stawarz, Ł., Koziel-Wierzbowska, D.,  
*Understanding Giant Radio Galaxy J1420-0545: Large-scale Morphology, Environment, and Energetics*,  
2011, *Astrophys. J.*, 740, 58

H10. Saikia, D.J., Jamrozy, M.,  
*Recurrent activity in Active Galactic Nuclei*,  
2009, *Bull. Astron. Soc. India*, 37, 63

#### 4c. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z przedstawieniem ich ewentualnego wykorzystania:

Spośród osiemdziesięciu recenzowanych prac, opublikowanych po uzyskaniu przeze mnie stopnia doktora (tj. od początku 2003 roku), niniejszym omawiam dziesięć wybranych publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego. Prace te, jak poniżej uzasadniam, podsumowują tematykę najważniejszych badań naukowych, które prowadziłem przez ostatnie lata oraz składają się na spójną całość zagadnienia galaktyk aktywnych z wielokrotną emisją dżetów. Wybrane publikacje ilustrują różnorodną metodologię badań w podejściu do wymienionego wyżej problemu stosowaną przeze mnie i moich współpracowników. Obejmują one projektowanie i prowadzenie oryginalnie zaproponowanych kampanii obserwacyjnych, pozyskiwanie danych z archiwów i literatury, redukcję danych obserwacyjnych oraz ich analizę, obliczenia analityczne i modelowanie

numeryczne. Badania naukowe prezentowane w publikacjach były w dużej mierze wykonywane w ramach projektów badawczych Komitetu Badań Naukowych (KBN), którymi kierował prof. dr hab. Jerzy Machalski, dlatego też Profesor jest współautorem siedmiu prezentowanych prac.

#### 4c1. Motywacje naukowe:

Podobnie jak nasza, także inne galaktyki, posiadają w swych centrach supermasywne czarne dziury (ang. Supermassive Black Holes; SMBHs), które są nieodzownym rezultatem formowania się tychże galaktyk. Niektóre SMBHs mogą być otoczone materią w postaci dysku (o typowym rozmiarze rzędu Układu Słonecznego). Twory te nazywamy aktywnymi jądrami galaktycznymi (ang. Active Galactic Nuclei; AGNs). Bolometryczna jasność najsłabszych AGNów wynosi  $L_{\text{bol}} \sim 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ , zaś najjaśniejszych  $\sim 10^{48} \text{ erg s}^{-1}$  (Ho, 2008, ARA&A, 46, 475; Jogee, 2006, LNP, 693, 143). Odpowiadające tym skrajnym przypadkom tempo akrecji (wyznaczone przy założeniu standardowej wydajności radiacyjnej  $\epsilon \sim 0.1$ ) wynosi odpowiednio  $\dot{M}_{\text{BH}} \sim (10^{-5} - 10^{-4}) M_{\odot} \text{ rok}^{-1}$  oraz  $\dot{M}_{\text{BH}} \sim (10 - 100) M_{\odot} \text{ rok}^{-1}$ .

Niewielka ( $\sim 15\text{-}20\%$ ; Urry i Padovani, 1995, PASP, 107, 803) grupa AGNów jest detektowana na falach radiowych. W obiektach tych część energii grawitacyjnej rotującej czarnej dziury jest przekazywana naładowanym cząstkom, które są wyrzucane w dwóch przeciwnych współosiowych kierunkach z bardzo dużymi (relatywistycznymi) prędkościami. Wyrzuty te formują cienkie strugi (dżety), a one z kolei zasilają w materię i pole magnetyczne powiększające się z czasem rozległe obszary (tzw. płyty, loby) promieniowania synchrotronowego (Scheuer, 1974, MNRAS, 166, 513). Pozagalaktyczne obiekty promieniowania radiowego są znane już od przeszło sześciu dekad (Baade i Minkowski, 1954, ApJ, 119, 206).

Rozróżniamy dwa podstawowe typy radioźródeł pozagalaktycznych: FRI i FR II (Fanaroff i Riley, 1974, MNRAS, 167, 31), które różnią się od siebie głównie morfologią i mocą promieniowania (jej graniczna wartość wynosi  $P_{178\text{MHz}} \sim 2 \times 10^{25} \text{ W Hz}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ , dla  $H_0 = 50 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ). FRI to obiekty o mniejszej jasności radiowej, posiadające dyfuzyjne płyty, których najjaśniejsze obszary leżą blisko jądra, a jasność radiowa spada wraz z odległością od centrum. W FR II płyty radiowe są najjaśniejsze na końcach, na których ulokowane są tzw. gorące plamy czyli miejsca, w których dżet relatywistycznej materii zderza się z ośrodkiem międzygalaktycznym, tworząc naddźwiękową falę uderzeniową. Wielkoskalowe dżety w radiogalaktykach typu FR II są lepiej skolimowane choć bardziej asymetryczne, niż te w FRI. Te asymetrie związane są ze wzmocnieniem dopplerowskim (pojaśnieniem) dżetu poruszającego się w kierunku do obserwatora. Linie sił pola magnetycznego w obiektach FR II układają się wzdłuż dżetów niemal na całej ich długości, natomiast w obiektach typu FRI wektory pola magnetycznego są przeważnie prostopadłe do osi dżetów (Saikia i Salter, 1988, ARA&A, 26, 93).

Typowe rozmiary radiogalaktyk, które początkowo mieszczą się wewnątrz macierzystej galaktyki, wynoszą kilkadziesiąt kiloparseków, a w skrajnych przypadkach mogą dochodzić nawet do kilku megaparseków, co przewyższa nawet wielkość niektórych gromad galaktyk. Takich ponad megaparsekowych, gigantycznych obiektów (ang. giant radio galaxies; GRGs) znamy dziś około 300. Rozważano wiele czynników, których efektem mogłyby być tak duże rozmiary ww. radioźródeł. W analitycznych modelach opisujących ewolucję radiogalaktyk (m.in. Falle, 1991, MNRAS, 250, 581; Komissarov i Falle, 2003, MNRAS, 343, 1045; Kaiser i Alexander, 1999, MNRAS, 302, 515; Blundell i in., 1999, AJ, 117, 677) dynamiczna struktura źródła jest funkcją czasu, gęstości ośrodka zewnętrznego i mocy dżetu. Zatem najbardziej naturalne jest szukanie przyczyny tak dużych rozmiarów niektórych radiogalaktyk wśród ekstremalnych wartości podanych wyżej parametrów. Do tej pory jednak nie uzyskano jednoznacznych wyników świadczących o dominującej roli któregoś z nich w powstawaniu gigantów. Machalski i in. (2004, AcA, 54, 249) zauważyli, że w badanej próbie gigantów widoczna jest kombinacja ponadprzeciętnych wartości wszystkich tych wielkości (tj. większy niż przeciętny wiek i moc dżetu

oraz mała gęstość ośrodka zewnętrznego).

Na przełomie dwudziestego i dwudziestego pierwszego wieku odkryto niezwykle ciekawą klasę radiogalaktyk o niestandardowej budowie morfologicznej (np. Schoenmakers i in., 2000, MNRAS, 315, 371). Mapy radiowe obiektów tego typu pokazują bowiem struktury znacznie różniące się od siebie wiekiem. Powszechnie przyjmuje się, że struktury te pochodzą z różnych epok aktywności tego samego centralnego AGNu, przedzielonych okresami jego „uśpienia”. Istotną cechą charakteryzującą obiekty o wielokrotnej (restartującej) aktywności jest to, że dżety pierwszego cyklu rozchodzą się w „pierwotnym” ośrodku międzygwiazdowym i międzygalaktycznym, natomiast te pochodzące z późniejszej fazy (ew. późniejszych faz) propagują się już w środowisku znacząco zmodyfikowanym na skutek wcześniejszego oddziaływania relatywistycznej plazmy radiowej z materią otoczenia. Grupa radiogalaktyk wykazujących cechy cykliczności fazy aktywnej jest niewielka i liczy obecnie około sześćdziesięciu obiektów (Saikia i Jamrozy, 2009, BASI, 37, 63; Nandi i Saikia, 2012, BASI, 40, 121).

W pracy Subrahmanyan i in. (1996, MNRAS, 279, 257), w której przedstawiono badania kilku jasnych, gigantycznych radiogalaktyk postuluje się, że mogły one uzyskać tak duże rozmiary, ponieważ posiadały kilka okresów aktywności dżetowej centralnego AGNu.

Dotychczasowe badania galaktyk restartujących koncentrują się na kilku radioźródłach o gigantycznych (megaparsekowych) rozmiarach, gdyż to właśnie takie obiekty dominują w omawianej klasie. Dzięki unikatowym badaniom, których jestem współautorem, udało się określić, m.in. czas „uśpienia” centralnego AGNu. Stosując techniki wieloczęstotliwościowej analizy radiowej promieniowania synchrotronowego dla kilku obiektów, otrzymano oszacowanie czasu (rzędu kilku milionów lat) trwania fazy nieaktywnej. Co ciekawe, okres ten jest zbyt długi, by wyjaśnić go przy pomocy większości obecnie preferowanych modeli teoretycznych opisujących funkcjonowanie AGNów, np. niestabilności dysku akrecyjnego otaczającego SMBH (czas nieaktywności rzędu  $10^4$  lat; Czerny i in., 2009, ApJ, 698, 840). Z drugiej strony, otrzymana przez nas długość okresu uśpienia jest za krótka, by brać pod uwagę hipotezę o całkowitym zaniku starego dysku i uformowaniu się nowego. Próba wyjaśnienia tej sprzeczności mogą być hipotezy (np. Liu i in., 2003, MNRAS, 340, 411; 2004, MNRAS, 347, 1357; 2012, ApJ, 746, 176) zakładające istnienie w centrach galaktyk restartujących pary supermasywnych czarnych dziur. Jedna z nich, tuż przed kolapsem z drugą, niszczy wewnętrzne części dysku akrecyjnego, odcinając w ten sposób dopływ materii do centralnego obiektu, co w rezultacie powoduje zanik dżetów. Po pewnym czasie wewnętrzne części dysku zostają odbudowane i aktywność może być wznowiona. Brak jednak ciągle przekonujących dowodów obserwacyjnych popierających tę hipotezę. Ponadto, mechanizm wznowiania aktywności może być powszechnym procesem zachodzącym w AGNach, a niezbyt duża grupa rozpoznanych radiogalaktyk restartujących wśród wszystkich radioźródeł (dziesiątki milionów) jest wynikiem li tylko „niedoskonałości” dotychczas stosowanych technik obserwacyjnych. Ważnym czynnikiem w badaniach radiogalaktyk restartujących jest stworzenie odpowiednio dużej liczbowo próbki radiogalaktyk z wielokrotną aktywnością dżetową. Pierwszą próbę jej budowy podjęli Saikia i Jamrozy (2009, BASI, 37, 63) oraz Nandi i Saikia (2012, BASI, 40, 121). W ten sposób wykonano ważny krok. Kolejnym - powinno być wyznaczenia parametrów fizycznych, w tym wieku struktur radiowych, dla większej ilości obiektów.

#### **4c2. Metodologia badań:**

Jednym z warunków zrozumienia ewolucji dynamicznej radiogalaktyk jest określenie parametrów fizycznych ich centralnego AGNu. Parametry te można uzyskać w drodze analizy wieloczęstotliwościowych danych radiowych. Moje obserwacje radiowe na niskich

częstotliwościach (150 - 610 MHz) były wykonywane przy pomocy interferometru Giant Metrewave Radio Telescope (GMRT) w Indiach, zaś na wysokich częstotliwościach (1.4 - 10 GHz) - przy pomocy interferometru Very Large Array (VLA) w USA. Zgromadzone dobrej jakości dane radiowe, wykonane dla poszczególnych obiektów w szerokim zakresie częstotliwości, są podstawą do określenia: struktury morfologicznej badanych obiektów, kształtu ich widma radiowego, mocy radiowej różnych części radioźródła, natężenia emisji spolaryzowanej i jej struktury oraz miary rotacji Faraday'a na różnych częstotliwościach radiowych. Z kolei, wielkości te służą do wyznaczenia wartości natężenia pola magnetycznego w obszarach emisji radiowej, gęstości gazu wewnątrz, jak i otaczającej obszary emisji radiowej (w sposób pośredni, tzn. w ramach analizy efektów depolaryzacji emisji radiowej), wieku synchrotronowego i dynamicznego radioźródła oraz całkowitej mocy dżetu. W celu zrozumienia cyklicznej aktywności dżetowej kluczowe jest wyznaczenie wieków starych i młodych struktur radiowych oraz długości okresu nieaktywności. Informacje te są zawarte w rozległych płytach radiowych, dlatego analizuję ich wieki spektralne i dynamiczne, wykorzystując do tego narzędzia numeryczne (pakiety SYNAGE, DYNAGE). Wiek spektralny cząstek w różnych częściach lobu może być wyznaczany przy użyciu klasycznej teorii promieniowania synchrotronowego, opisującego ewolucję widma populacji cząstek naładowanych o początkowym wykładniczym rozkładzie energii. Wartość wykładnika tego rozkładu jest powiązana z początkowym nachyleniem widma radiowego. Załamanie (odejście od początkowego rozkładu energii) w widmie radiowym na wyższych częstotliwościach jest związane z wiekiem synchrotronowym cząstek. Wartość początkowego indeksu widmowego i częstotliwość załamania mogą być uzyskane przez dopasowanie modeli strat synchrotronowych (Jaffe i Perola, 1973, A&A, 26, 423; Kardashev, 1962, SvA, 6, 317; Myers i Spangler, 1985, ApJ, 291, 52; Carilli i in., 1991, ApJ, 383, 554) do obserwowanego widma radiowego. Oczywiście należy brać pod uwagę fakt, że wiek synchrotronowy promieniujących cząstek nie musi być identyczny z wiekiem (dynamicznym) danego radioźródła. Podczas estymacji wieku synchrotronowego należy pamiętać o konsekwencjach przyjmowanych założeń początkowych. Wystramianie widma może następować nie tylko na skutek wyświecania synchrotronowego, ale również być efektem, np. ewolucji lokalnego pola magnetycznego (patrz np. Rudnick, Katz-Stone i Anderson, 1994, ApJS, 90, 955; Eilek i Arendt, 1996, ApJ, 457, 150; Jones, Ryu i Engel 1999, ApJ, 512, 105). Zagadnienia te opisuję obszernie we wstępie do pracy Machalski, Jamrozy, Saikia (2009, MNRAS, 395, 812). Również Blundell i Rawlings (2000, AJ, 119, 1111) analizowali ten problem i doszli do wniosku, że wiek synchrotronowy dobrze oddaje wiek dynamiczny radioźródła dla obiektów, które są młodsze niż  $10^7$  lat. Dlatego też, zdając sobie sprawę z pewnych ograniczeń metody synchrotronowej, wyznaczam wieki struktur również w oparciu o dynamiczną analizę danych radiowych. Metoda ta opisana w pracy Machalski i in (2007, A&A, 462, 43; pakiet DYNAGE) polega na połączeniu obserwowanej emisji synchrotronowej z dynamicznym oddziaływaniem czoła dżetu z gazowym ośrodkiem międzygwiazdowym i międzygalaktycznym. Zaletą modelowania dynamicznego opartego również na wieloczęstotliwościowych danych radiowych jest, prócz możliwości wyznaczenia wieku dynamicznego, otrzymanie także innych parametrów płytów radiowych (tj. gęstości, ciśnienia, całkowitej energii), jak również odpowiednich parametrów ośrodka, który je otacza.

#### 4c3. Omówienie poszczególnych prac:

[H1] *W pracy przedstawiono badania radiowe kilkadziesiątu gigantycznych radiogalaktyk.* W publikacji tej analizuję próbkę trzydziestu sześciu radiogalaktyk, których rozmiary radiowe przekraczają 1 Mpc (dla  $H_0=50 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ). Pierwsza praca z tej serii została opublikowana w 2001 roku (Machalski, Jamrozy, Zola, 2001). Omawiana publikacja wnosi jednak wiele nowych danych i ukazuje istotne wyniki. Na początku przedstawiona jest fotometria uzyskana 1.8-metrowym teleskopem w Asiago Astrophysical Observatory (Włochy). Dane posłużyły do

identyfikacji obiektów macierzystych trzech gigantów radiowych oraz estymowania ich fotometrycznego przesunięcia ku czerwieni. Ponadto, opisano dane dotyczące nowych widm optycznych sześciu obiektów uzyskanych w Apache Point Observatory (USA) i wykonano na ich podstawie pomiar przesunięcia ku czerwieni dla czterech obiektów. Zasadniczą częścią pracy są wyniki obserwacji radiowych na 5 GHz wykonanych teleskopem VLA dla dwudziestu obiektów. Są to obserwacje strumienia całkowitego (tzw. total power) i spolaryzowanego. Dane te uzyskałem w wyniku zrealizowania czterech własnych projektów obserwacyjnych. Dane z konfiguracji C-array (anteny bardziej rozproszone) były wykorzystywane do detekcji zwartych obiektów (jąder radiowych, gorących plam), zaś te uzyskane z konfiguracji D-array (najbardziej zwartej) służyły głównie do określania parametrów struktur rozciągniętych (tj. lobów radiowych). Częstotliwość obserwacji 5 GHz wybrałem celowo. Z jednej strony zakres ten i konfiguracja anten pozwala na uzyskanie dobrej zdolności rozdzielczej (kilkanaście sekund łuku), natomiast z drugiej - zapewnia w miarę przyzwoitą czułość na dyfuzyjne rozciągnięte struktury radiowe o stromym widmie energetycznym. W publikacji opisałem szczegóły redukcji wykonanej przy pomocy pakietu Astronomical Image Processing System (AIPS). Przedstawiłem mapy dla dwudziestu obiektów. Ze względu na obszerność materiału większość z nich pokazana jest tylko w dodatku elektronicznym do niniejszej pracy. Dla siedemnastu z nich wykonałem, oprócz map strumienia całkowitego, także obrazy: strumienia spolaryzowanego i procentu polaryzacji. Jest to pierwsze, i jak do tej pory jedyne, tak obszerne i jednorodne ujęcie badań polarymetrycznych tej klasy obiektów. Na mapach radiogalaktyk J0927+3510 i J1604+3438 widoczne są ciekawe struktury morfologiczne w postaci dwóch par lobów, co pozwoliło mi zaklasyfikować je jako kandydatki na radiogalaktyki restartujące. Dla całej próbki podałem następujące wielkości: strumień całkowity obiektów na częstotliwości 1.4 GHz; indeks spektralny pomiędzy częstotliwościami 0.3 i 5 GHz; strumień jądra radiowego na 5 GHz; rozmiar liniowy; stosunek rozmiaru podłużnego do poprzecznego radiogalaktyki; identyfikację optyczną; jasność optyczną galaktyki macierzystej w barwie czerwonej (R-band) oraz przesunięcie ku czerwieni (spektroskopowe lub fotometryczne). Na podstawie wcześniej wymienionych parametrów obserwacyjnych dla trzydziestu trzech obiektów oszacowałem, m.in. rozmiar liniowy, całkowitą moc radiową na 1.4 GHz, moc jądra na 5 GHz, średnie natężenie pola magnetycznego, wartość minimalną gęstości energii oraz całkowitą energię obiektu. Średnia wartość natężenia pola magnetycznego dla całej próbki wynosi  $0.18 \pm 0.09$  nT. Uzyskałem ją adaptując formalizm przedstawiony w pracy Mileya (1980, ARA&A, 18, 165) i czyniąc powszechnie stosowane założenia, co do ekwipartycji energii, geometrii struktury radiowej, współczynnika wypełnienia struktury cząstkami, stosunku ilości elektronów i protonów oraz zakresu energetycznego widma. Ponadto, dysponując danymi polarymetrycznymi dla lobów siedemnastu gigantów na 1.4 GHz (dane uzyskane z analizy map parametrów Stokesa I, Q, U przeglądu NRAO VLA Sky Survey, NVSS; Condon i in., 1998, AJ, 115, 1693) i 5 GHz wyznaczyłem stopień polaryzacji, średni kąt wektorów pola magnetycznego oraz miarę depolaryzacji i rotacji wektorów pola magnetycznego. W końcowej części pracy dokonałem porównania średnich parametrów (m.in. średnie przesunięcie ku czerwieni, średnia moc radiowa) dla przedstawianej i trzech innych (zaczepniętych z literatury) próbek gigantów. Wybrane wartości parametrów selekcji, tj. rozmiaru kąтового i minimalnego strumienia obiektu, pozwoliły na stworzenie najgłębszej próbki (mediana przesunięcia ku czerwieni  $0.38 \pm 0.07$ ). Otrzymane w pracy dane były podstawą do analiz wieloczęstotliwościowych poszczególnych obiektów w innych prezentowanych tutaj publikacjach (np. [H3]).

[H2] *W pracy tej po raz pierwszy zastosowano analizę wieku spektralnego w różnych częściach gigantycznej radiogalaktyki w oparciu o wieloczęstotliwościowe mapy radiowe w zakresie od 0.3 do 8 GHz.*

W publikacji tej pokazana jest analiza własności struktury radiowej odkrytego przez nas kilka lat wcześniej giganta J1343+3758 (o rozmiarze przeszło 3 Mpc). Jako dane wejściowe posłużyły

informacje z zakresu od 0.150 do 8 GHz. Dane na niskich częstotliwościach zaczerpnąłem z ogólnie dostępnych przeglądów, natomiast obserwacje w promieniowaniu całkowitym i spolaryzowanym na 5 i 8 GHz zaplanowałem oraz wykonałem osobiście. Detekcje i analiza danych na 5 GHz wykonałem przy pomocy interferometru VLA. Natomiast obserwacje na 8 GHz (dokładnie 8.35 GHz) przeprowadziłem przy pomocy 100-metrowej pojedynczej anteny w Effelsbergu (Niemcy). Dane te zredukowałem przy pomocy pakietu MPIfR-NOD2, a następnie, podobnie jak mapy Stokesa I, Q, U na 1.4 i 5 GHz, analizowałem przy pomocy pakietu AIPS. Zgromadzone mapy pozwoliły na przeprowadzenie wieloczęstotliwościowej (0.3, 1.4, 5.0 i 8.3 GHz) analizy wieku struktur radiowych w trzech różnych miejscach w każdym z lobów. Wybór konfiguracji obszarów prostopadłych do osi dżetów uzasadniał pasmowy (warstwowy) rozkład indeksu spektralnego, wskazujący na stromienie widma radiowego w kierunku od gorących plam ku centrum.

Relatywistyczne cząstki naładowane tracą energię w różnych procesach. Dla warunków fizycznych panujących w lobach radiogalaktyk najważniejszymi mechanizmami utraty energii są: straty synchrotronowe w obecności pola magnetycznego ( $\propto E^2$ ), straty w odwrotnym efekcie Comptona w obecności pola fotonowego ( $\propto E^2$ ) oraz straty adiabatyczne generowane w wyniku ekspansji plazmy ( $\propto E$ ). W wyniku wykładniczej zależności strat od energii dla ww. procesów, wysokoenergetyczne cząstki będą szybciej tracić energię niż te o mniejszej energii. Będzie to prowadzić do załamania pierwotnego potęgowego widma energetycznego cząstek. W wyniku czego, widmo promieniowania o pewnym początkowym nachyleniu  $\alpha_{inj}$  (gdzie  $\alpha_{inj} = \{\gamma - 1\}/2$ ;  $\gamma$  - wykładnik w rozkładzie energii cząstek) będzie się wystramiać dla częstotliwości większych niż częstotliwość załamania (przebieg)  $\nu_b$ . W analizie wieku spektralnego (synchrotronowego; ang. spectral ageing analysis) uwzględniłem trzy modele: a) Kardashev-Pacholczyk (KP; Kardashev, 1962, SvA, 6, 317; Pacholczyk, 1970, Radio Astrophysics), który zakłada jednorazowe dostarczenie cząstek naładowanych do lobu oraz stały anizotropowy rozkład kąta natarcia (ang. pitch-angle) pomiędzy średnim wektorem prędkości cząstek a średnim kierunkiem linii sił pola magnetycznego (dla tego modelu nachylenie widma na wysokich częstotliwościach wynosi  $\frac{4}{3}\alpha_{inj} - 1$ ); b) Jaffe-

Perola (JP; Jaffe i Perola, 1973, A&A, 26, 423), który jest podobny do ww. modelu KP z wyjątkiem izotropowego rozkładu kątów natarcia (pitch-angle) cząstek względem pola (dla częstotliwości większych niż  $\nu_b$  prowadzi to do eksponencjalnego stromienia widma); c) ciągłego dostarczania cząstek (ang. continuous injection CI; Carilli i in., 1991, ApJ, 383, 554) o potęgowym widmie energetycznym do lobu (superpozycja populacji cząstek w różnym wieku prowadzi do wysokoczęstotliwościowego nachylenia widma typu  $\alpha_{inj} - 0.5$ ). Wyżej wymienione modele zostały szerzej opisane, m.in. w pracy Myers i Spangler (1985, ApJ, 291, 52). Załamanie w widmie  $\nu_b$  „przesuwa” się z czasem w kierunku niższych częstotliwości, co stwarza możliwość estymowania wieku promieniującej plazmy. Założyłem ponadto, że modelowane procesy zachodzą w warunkach minimum energii, pole magnetyczne w poszczególnych częściach lobu jest stałe w czasie oraz, że wszystkie cząstki mają taki sam początkowy rozkład energii, co przekłada się na stałą wartość  $\alpha_{inj}$ . W najbardziej fizycznie realistycznym modelu JP wiek spektralny,  $t$ , jest związany z częstotliwością przebiegania zależnością  $t = 50.3 \frac{\sqrt{B}}{B^2 + B_{IC}^2} (\nu_b(1+z))^{-1/2}$  [Myr], gdzie

$B_{IC} = 0.318(1+z)^2$  [nT] (równoważnik pola magnetycznego promieniowania tła) oraz  $\nu_b$  wyrażone w GHz. Dopasowanie parametrów modeli (tj.  $\alpha_{inj}$ ,  $\nu_b$ ) do widm obserwacyjnych dokonałem przy pomocy pakietu SYNAGE (Murgia, 1999, Laurea Thesis, Univ. of Bologna). Estymowany wiek spektralny dla obu lobów, przy założeniu ekwipartycji energii, wyniósł ok. 50 milionów lat. Związanie wieku i rozmiaru dało średnią prędkość separacji rzędu 0.14c. Dla porównania estymowana przeze mnie średnia postępową prędkość czoła dżetu jest o rząd wielkości mniejsza. By wyeliminować te niezgodności, zaproponowałem 3-5-ciokrotne zwiększenie, niż wynika to z warunków ekwipartycji, wartości natężenia pola magnetycznego w lobie. Operacja ta zaowocowała otrzymaniem średniej wartości prędkości separacji rzędu 0.06c i podobnej średniej

postępowej prędkości czoła dżetu  $0.03c$  oraz związanej z tym wartości wieku dynamicznego rzędu 200 milionów lat. Czterokrotna różnica wieku synchrotronowego i dynamicznego dla badanego obiektu jest zgodna z przewidywaniami dotyczącymi różnicy tych dwóch odrębnych oszacowań wieku dla starszych ( $t > 10$  mln. lat) obiektów (Blundel i Rawlings, 2000, AJ, 119, 1111). Z drugiej strony, różnica ta nie jest znacząco duża i w tym sensie wiek spektralny cząstek może być przybliżeniem wieku obiektu. Ponadto, korzystając z modelu ewolucji dynamicznej radiogalaktyk (Kaiser i in., 1997, MNRAS, 292, 723) estymowałem inne parametry dla lobów J1343+3758, tj. moc dżetu ( $\sim 30^{38}$  W), centralną gęstość materii ( $\sim 6 \times 10^{-24}$  kg m $^{-3}$ ), gęstość materii na końcu lobów ( $\sim 3 \times 10^{-27}$  kg m $^{-3}$ ), gęstość energii lobów ( $\sim 10^{-14}$  J m $^{-3}$ ), całkowitą energię lobów ( $\sim 8 \times 10^{52}$  J). Jak zaznaczyłem na wstępie praca ta jest pierwszą próbą dogłębnej analizy wieku gigantycznej radiogalaktyki. Oszacowany wiek spektralny  $\sim 5 \times 10^7$  lat (lub  $\sim 20 \times 10^7$  lat – wiek dynamiczny) jest zadziwiająco mały jak dla tak rozległego (3 Mpc) obiektu.

[H3] *W pracy tej, przy zastosowaniu metody wieloczęstotliwościowej analizy spektralnej opisanej w publikacji [H2], podano estymację wieku i pola magnetycznego dla większej próbki rozległych radiogalaktyk.*

W oparciu o wieloczęstotliwościowe mapy radiowe przedstawione w pracy Konar i in. (2006, MNRAS, 372, 693) oraz przy wykorzystaniu metody analizy spektralnej opisanej w pracy [H2] dokonałem estymacji wieku lobów dla dziesięciu gigantycznych radiogalaktyk. Przedstawiłem sposób podziału lobów na niezależne fragmenty (rekord stanowi 21 fragmentów dla obiektu J1331+6937), w których dokonywałem pomiarów strumienia radiowego. Dla każdego analizowanego obiektu (wyj. J1343+3758 i J1453+3308, które były prezentowane w innych publikacjach, Jamrozy i in., 2006, MNRAS, 372, 693; Konar i in., 2008, MNRAS, 383, 525) przedstawiłem mapy rozkładu indeksu spektralnego, dwuwymiarowe radiowe profile jasności na kilku częstotliwościach oraz rozkłady wieku spektralnego. Użyłem dwóch nieco różnych sposobów estymowania wartości natężenia pola magnetycznego w poszczególnych obszarach lobów: tzw. „klasycznego” ujęcia według przepisu podanego przez Mileya (1980, ARA&A, 18, 185) oraz „zrewidowanego” ujęcia zaproponowanego w pracy Beck i Krause (2005, Astr. Nachr., 6, 414). Założenia czynione przy estymowaniu natężenia pola magnetycznego w tych dwóch ujęciach zostały szczegółowo opisane w pracy Konar i in. (2006, MNRAS, 372, 693). Generalnie, estymowane „zrewidowane” wartości natężenia pola magnetycznego są większe od „klasycznych” o czynnik rzędu 3. Uzyskane wartości wieku spektralnego obiektów zawierają się w przedziale pomiędzy 6 a 46 milionów lat (mediana 23 miliony lat) lub pomiędzy 5 a 58 milionów lat (mediana 24 miliony lat), odpowiednio dla „klasycznego” lub „zrewidowanego” oszacowania wartości natężenia pola magnetycznego. W prawie wszystkich obiektach (wyjątek stanowi południowo-wschodni płat J1313+6937) wiek spektralny systematycznie rośnie w kierunku od gorącej plamy do jądra, potwierdzając tym samym założenie o przyspieszaniu cząstek (głównie) w gorących plamach. Zależność „wiek spektralny – odległość od jądra” może być przybliżony funkcją liniową dla wszystkich obiektów z wyjątkiem jednego. Dla J2312+1845 (inna nazwa 3C457) ewidentnie widoczny jest spadek prędkości separacji (efekt hamowania) dla obszarów bardziej odległych od jądra. Porównanie wieku gigantów z wiekiem mniejszych radiogalaktyk (dane zaczerpnięte z literatury: Liu i in. 1992, MNRAS, 257, 545) pokazuje, że większe obiekty są z reguły starsze. Obiekty J0927+3510 i J1604+3438, które podejrzewałem (patrz [H1]) o wielokrotną aktywność dżetową, rzeczywiście, w obszarach bliskich jądra wykazują obniżenie wieku spektralnego. Estymowane wartości  $\alpha_{inj}$  znajdują się w przedziale od 0.55 do 0.88 (mediana 0.6). Porównuję je z przewidywaniami teoretycznymi, jakie mogą uzyskać cząstki przyspieszane w szokach (relatywistycznych i nierelatywistycznych) oraz z wartościami uzyskanymi dla innego typu radiogalaktyk. Następnie konstruję wykresy zależności  $\alpha_{inj}$  od jasności radiowej, rozmiaru liniowego i przesunięcia ku czerwieni danego giganta. Na ich podstawie ujawniłem silne korelacje  $\alpha_{inj}$  z jasnością oraz przesunięciem ku czerwieni. Wydaje się, że pierwsza zależność może



odzwierciedlać już dobrze znaną korelację „indeks spektralny - jasność radiowa” (opisaną m.in. w pracy Laing i Peacock, 1980, MNRAS, 190, 903).

[H4] *W pracy tej porównuje się parametry fizyczne radiogalaktyk gigantycznych uzyskane z analizy spektralnej i dynamicznej.*

W publikacji porównuję oszacowanie wieku uzyskane z podejścia dynamicznego i spektralnego dla dziesięciu gigantycznych radiogalaktyk. Dane radiowe oraz metodę estymacji wieku spektralnego opisałem wcześniej w punkcie [H3]. Podstawy teoretyczne ewolucji czasowej radiogalaktyk FR II, które są podstawą modelowania dynamicznego, zostały stworzone przez Scheuera (1974, MNRAS, 166, 513) oraz Blandforda i Reesa (1974, MNRAS, 169, 395). Następnie były modernizowane i udoskonalane przez wielu innych autorów (m.in. Begelman i Cioffi, 1989, ApJ, 345, L21; Falle 1991, MNRAS, 250, 581; Kaiser i Alexander, 1997, MNRAS, 286, 215; Kaiser i in., 1997, MNRAS, 292, 723; Blundell i in., 1999, AJ, 117, 677; Manolakou i Kirk, 2002, A&A, 391, 127). Model ewolucji dynamicznej pozwala na estymowanie rozmiaru obiektu i jego jasności radiowej dla zadanych: mocy dżetu, czasu życia obiektu i gęstości zewnętrznego ośrodka, przy uwzględnieniu utraty energii naładowanych relatywistycznych cząstek w procesach synchrotronowym, odwrotnym efekcie Comptona i adiabatycznym rozszerzaniu się płatów. Powyższe idee ewolucji dynamicznej zostały zebrane i konsystentnie zapisane w pracach Kaiser i Alexander (1997, MNRAS, 286, 215), Kaiser i in. (1997, MNRAS, 292, 723) oraz Kaiser i Best (2007, MNRAS, 381, 1548). Algorytm DYNAGE (Machalski i in., 2007, A&A, 462, 43) realizuje założenia wyżej przedstawionego modelu ewolucji dynamicznej radioźródeł typu FR II, ale jego działanie przebiega w odwrotnym kierunku, tj. pozwala estymować nieobserwowane bezpośrednio globalne parametry fizyczne obiektu na podstawie jego bieżącego wyglądu (rozmiarów) i znajomości strumienia radiowego. Jak można się było spodziewać estymacja dynamiczna daje nieco inne oszacowania wieku (i innych parametrów fizycznych) dla poszczególnych płatów tego samego obiektu. Stosunek wieku dla łobów mieści się w przedziale od  $\sim 1.1$  do  $\sim 1.4$ . Różnice wieku pomiędzy płatami mogą być zniwelowane przy rezygnacji z ekwipartycji energii i odpowiedniej zmianie natężenia pola magnetycznego. Porównanie wieku synchrotronowego i dynamicznego płatów daje ich stosunki w przedziale od  $\sim 1$  do  $\sim 5$ . Zagadnienie to było już wcześniej omawiane w literaturze. Modelowanie dynamiczne lepiej szacuje straty energetyczne w zakresie niskich częstotliwości radiowych niż podejście analizy spektralnej. W zakresie niskich częstotliwości efektywnie wyświecają się źródła stare, dla których to występują największe różnice w estymowanym dla nich wieku dynamicznym i spektralnym. Problem ten przenosi się również na młodsze odległe radioźródła, dla których wysokoczęstotliwościowe załamanie w widmie, z układu źródła, transformuje się wraz z przesunięciem ku czerwieni do niskich częstotliwości w układzie obserwatora.

[H5] *Publikacja zawiera globalną analizę uzyskanych parametrów fizycznych dla gigantycznych radiogalaktyk oraz radioźródeł o mniejszych rozmiarach.*

Celem analiz przedstawionych w niniejszej pracy było statystyczne zbadanie: czy i jak bardzo gigantyczne radiogalaktyki różnią się od, posiadających mniejsze rozmiary (nazywanych tu „normalnymi” radiogalaktykami). Dane dotyczące parametrów gigantycznych radiogalaktyk opisałem we wcześniejszych pracach, zaś te odnoszące się do normalnych radiogalaktyk zaczerpnąłem z literatury (np. z pracy Machalski i in. 2004, AcA, 54, 249) albo zmierzyłem/wyliczyłem na podstawie ogólnie dostępnych map. Narzędziem statystycznym stosowanym do badania korelacji parametrów fizycznych radiogalaktyk jest test Pearsona korelacji cząstkowych. Pozwala on na wyznaczenie parametrów korelacji dwóch zmiennych w obecności innej/yh dodatkowej/yh zmiennej/yh i wskazanie, która z korelacji jest silniejsza i bardziej pierwotna. Analizując jednocześnie obiekty o normalnych i gigantycznych rozmiarach doszedłem do następujących wniosków: a) wydatność jądra radiowego (definiowana jako  $S_{\text{jadra}}/[S_{\text{całkowity}}-S_{\text{jadra}}]$ ,

gdzie  $S$  oznacza strumień na wybranej częstotliwości radiowej) antykoreluje z radiową jasnością powierzchniową lobów; b) gęstość energii i ciśnienie wewnętrzne w lobach jest niezależne od przesunięcia ku czerwieni dla stałych: jasności radiowej i rozmiaru obiektu; pociąga to za sobą stwierdzenie o braku ewolucji ciśnienia ośrodka międzygalaktycznego (IGM) z przesunięciem ku czerwieni, co postulowano wcześniej (w postaci  $p_{\text{IGM}} \propto [1+z]^5$ ); c) natężenie pola magnetycznego w warunkach ekwipartycji ( $B_{\text{eq}}$ ) silnie antykoreluje z rozmiarem obiektu ( $D$ ), a prawdopodobieństwo przypadkowej korelacji jest mniejsze niż 0.0001; za tą korelacją kryje się prawdopodobnie bardziej podstawowa zależność pomiędzy polem magnetycznym a wiekiem obiektu; d) istnieje silna korelacja pomiędzy miarą depolaryzacji i rozmiarem liniowym analizowanych radiogalaktyk; jej przyczyną może być istnienie mniej gęstego ośrodka IGM otaczającego giganty w porównaniu do ośrodka znajdującego się wokół normalnych radiogalaktyk. Nasza analiza wykazała, że giganty w porównaniu z normalnymi radiogalaktykami nie stanowią odrębnej populacji. Ewolują one w czasie do tak dużych rozmiarów, poczynając od obiektów o niewielkich rozmiarach. Jednak ewolucja gigantów zachodzi w specyficznych, przedstawionych wyżej, warunkach fizycznych.

[H6] *Publikacja ta, podobnie jak dwie kolejne prace ([H7][H8]), zawiera analizę obiektu nowej populacji radiogalaktyk wykazujących cechy wielokrotnej aktywności dżetowej. [H6] przedstawia charakterystykę szczególnego gigantycznego obiektu J1548-3216.*

W pracy tej przedstawiam wyznaczenie wieku i innych parametrów fizycznych gigantycznej podwójno-podwójnej radiogalaktyki J1548-3216. Analizy prowadziłem w oparciu o mapy radiowe w zakresie od 0.3 do 5 GHz. Pomiary na niskich częstotliwościach (334 i 619 MHz) wykonałem teleskopem GMRT, a na częstotliwości 4860 MHz interferometrem VLA. Dane na 1384 2495 i 4910 MHz z teleskopów Australia Telescope Compact Array (ATCA) i VLA uzyskałem z archiwów. W pracy opisuję szczegóły wykonania obserwacji, ich redukcji i analizy. Jednym z ważniejszych zadań w tym procesie było „odfiltrowania” rozciąglej struktury zewnętrznych lobów i uzyskiwanie map wewnętrznej zwartej struktury oraz uzyskanie map dyfuzyjnej struktury bez udziału lobów wewnętrznych. Analizę wieku spektralnego przeprowadziłem osobno dla północnego i południowego lobu wewnętrznego oraz w osiemnastu strefach lobów zewnętrznych. Zastosowałem metody analizy wieku spektralnego podobne do tych opisanych w pracach [H2] i [H3]. Uzyskany w ten sposób wiek maksymalny dla zewnętrznego lobu południowego i północnego wynosi, odpowiednio,  $65.7^{+3.4}_{-9.6}$  i  $73.9^{+7.1}_{-1.7}$  mln. lat. Średni wiek lobów wewnętrznych ustaliłem na ok.  $9 \pm 5$  mln. lat. Wieki wyżej opisanych struktur radiowych uzyskałem również w oparciu o model analizy dynamicznej radioźródeł opisany w pracy Machalski i in. (2007, A&A, 462, 43). Do analizy wieku dynamicznego użyłem tych samych danych radiowych, jakie wykorzystałem w analizie wyżej opisanego wieku spektralnego. Wiek zewnętrznych płatów estymowałem na  $132 \pm 28$  miliony lat, zaś wewnętrznej struktury na  $9 \pm 5$  milionów lat. Wynika z tego, że wiek dynamiczny zewnętrznych płatów jest około dwa razy większy od wieku synchrotronowego, podczas kiedy estymowane tymi dwoma metodami wieki młodszej struktury są podobne. O różnicach wynikających z tych odrębnych oszacowań pisałem już przy okazji omawiania gigantycznej radiogalaktyki J1343+3758 [H2]. Biorąc pod uwagę rozmiary i podane wyżej wartości wieku uzyskałem średnią prędkość ekspansji (wzdłuż dżetu) zewnętrznych lobów wynoszącą około  $(0.012 \pm 0.003)c$  oraz  $(0.058 \pm 0.025)c$  dla wewnętrznych młodych płatów.  $\sim 5$  razy większa wartość prędkości dla wewnętrznych płatów może świadczyć o tym, że ekspandują one w dużo rzadszym ośrodku niż pierwotne (zewnętrzne płaty). Z analizy dynamicznej otrzymałem również wartości innych parametrów młodych i starych struktur, tj. indeksu spektralnego wstrzyknięcia,  $\alpha_{\text{inj}}$ , mocy dżetu, gęstości i ciśnienia ośrodka, w którym propagują się dżety. Ciekawie wygląda porównanie wartości mocy dżetu dla pierwotnego i wtórnego cyklu aktywności. Moc dżetu drugiego cyklu aktywności jest o rząd wielkości mniejsza, niż moc dżetu z pierwszego cyklu. Na uwagę zasługuje również parametr  $\alpha_{\text{inj}}$ , którego estymowana średnia wartość ( $\sim 0.5-0.6$ )

jest podobna dla pierwotnego i wtórnego cyklu aktywności. Co ciekawe, dla innych radioźródeł restartujących (przykład opisany w pracy [H7]) odnotowuje się również podobne wartości  $\alpha_{inj}$  dla struktur radiowych z różnych cykli aktywności.

[H7] *Praca opisująca odkrycie nowego obiektu, posiadającego dwa typy struktur radiowych - jasna wewnętrzna, „zanurzona” w dyfuzyjnej otoczce. Przeprowadzono wieloczęstotliwościową analizę parametrów poszczególnych składników.*

Radiogalaktyka 4C29.30 była badana przez van Breugela i in. (1986, ApJ, 311, 58). Jednak nikt do momentu publikacji niniejszej pracy nie zdawał sobie sprawy z tego, że centralne podwójne radioźródło mieszanego typu FRI/FRII jest zanurzone w wielkoskalowym dyfuzyjnym kokonie promieniowania synchrotronowego. Impulsem do badania tego obiektu było dokonane przeze mnie porównanie map z przeglądu Faint Images of the Radio Sky at Twenty-Centimeters (FIRST; Becker i in., 1995, ApJ, 450, 559) i NVSS. Na mapie z pierwszego przeglądu, niezaułego na wielkoskalowe struktury dyfuzyjne, widoczna była tylko wewnętrzna, wszystkim dobrze już znana struktura. Mapa NVSS wykonana w najbardziej zwartej konfiguracji anten VLA pokazała, że jasny centralny składnik otoczony jest słabym  $\sim 3$  razy bardziej rozległym kokonem. Istnienie tej struktury potwierdziłem w przeglądzie Westerbork Northern Sky Survey (WENSS; Rengelink i in., 1997, A&AS, 124, 259) na 325 MHz. Również mapa na wysokiej częstotliwości 4850 MHz wykonana przeze mnie teleskopem Effelsberg potwierdziła istnienie tej struktury. Następnie dokonałem analizy archiwalnych danych VLA na częstotliwości 1400 MHz. Na mapie tej najlepiej widać szczegóły rozległego kokonu. W następnym etapie wykonałem obserwacje na wysokich częstotliwościach teleskopem VLA i niskich częstotliwościach interferometrem GMRT. Łącznie posiadałem dane z zakresu od 240 do 8460 MHz. Zewnętrzny kokon o bardzo stromym widmie ( $\alpha \sim 1.3$ ;  $S \propto \nu^{-\alpha}$ ) ma rozmiary 520 sekund łuku, co odpowiada rozmiarowi liniowemu 639 kpc, zaś wewnętrzna struktura ( $\alpha \sim 0.8$ ) jest rozciągnięta na 29 sekund łuku ( $\sim 36$  kpc). Zastosowanie metody estymacji wieku spektralnego (przedstawionej wcześniej w H[2] i H[3]) do opisanych wyżej map pozwoliło mi na wyznaczenie wieku na  $\lesssim 33$  miliony lat i  $\gtrsim 200$  milionów lat dla, odpowiednio, wewnętrznej i zewnętrznej struktury. Nie podaję dokładnych wartości tylko limity, ponieważ częstotliwości załamania  $\nu_b$  w widmie znajdują się poza obszarem częstotliwości dostępnych dla naszych obserwacji (np. poniżej 240 MHz w przypadku dyfuzyjnego kokonu). Jak już zauważyłem, podczas analizy obiektu J1548-3216 (H[7]), a także dla 4C29.30 wartość  $\alpha_{inj}$  jest podobna dla starej i młodej struktury, i wynosi  $\sim 0.8$ . Ponadto analiza strumienia jądra radiowego, na częstotliwości 1.4 i 5 GHz, uzyskanego w różnych epokach wykazała jego dużą zmienność czasową (wzrost strumienia od  $\sim 10$  do  $\sim 60$  mJy na 5 GHz w ciągu ok. 20 lat). Świadczy to o ciągłej aktywności centralnego AGNu. Zmienność strumienia radiowego jądra zauważyliśmy także dla innego obiektu restartującego J1453+3308 (Konar i in., 2006, MNRAS, 372, 693). Podobne cechy wykazują radiogalaktyki restartujące 3C338 i B2 1144+352. W pracy analizuję jeszcze własności polaryzacji strumienia radiowego na 1.4 i 5 GHz. Opisujemy również własności promieniowania rentgenowskiego pochodzącego z centralnej części 4C29.30. Te ostatnie, zapoczątkowały nasze dalsze szczegółowe badania tego obiektu w dziedzinie rentgenowskiej teleskopami Chandra i XMM-Newton (Siemiginowska i in., 2012, ApJ, 750, 124; Sobolewska i in., 2012, ApJ, 758, 90).

[H8] *Letter opisujący odkrycie pierwszego kwazara posiadającego radiowe struktury typu podwójno-podwójnego. Wielokrotna aktywność dżetowa jest cechą uniwersalną wśród radioźródeł, a nie jest zarezerwowana tylko dla radiogalaktyk.*

W tej krótkiej pracy donoszę o odkryciu pierwszego obiektu podwójno-podwójnego (ang. double-double) stowarzyszonego nie z galaktyką, a z kwazarem. Znajdujący się w dużej odległości od nas ( $z \sim 0.65$ ) 4C02.27 był znany do tej pory jako radiokwazar o podwójnej bardzo asymetrycznej strukturze lobów. Mapy z przeglądu FIRST i dane GMRT na 619 MHz pokazują dodatkowy zewnętrzny dyfuzyjny płat znajdujący się w północno-wschodniej części obiektu. Niestety

posiadane mapy radiowe tylko na dwóch częstotliwościach nie pozwalają na wykonanie szczegółowej analizy wieku widocznych struktur radiowych. Jednak wyraźne są duże różnice w indeksie spektralnym zewnętrznych ( $\alpha > 1.3$ ) i wewnętrznych ( $\alpha \sim 0.7$ ) płatów. Obiekt wykazuje duże asymetrie strumienia obu zewnętrznych, jak i wewnętrznych płatów. Widoczne są też wyraźne asymetrie w długości ramion obu struktur. Są one prawdopodobnie wynikiem orientacji obiektu w stosunku do nas i wyjaśnienia dopplerowskiego promieniowania synchrotronowego, pochodzącego z dżetu, który skierowany jest w naszą stronę. Przy czym w strukturze zewnętrznej jaśniejszy jest południowy płat, a w strukturze wewnętrznej większy strumień dociera do nas z płata północnego. Analiza asymetrii ramion wewnętrznej struktury wykazała, że jej dżety mogą być usytuowane w stosunku do nas pod kątem  $\sim 40^\circ$ . Taka orientacja zgadza się z obserwowanym stosunkiem strumienia pikowego obu wewnętrznych płatów ( $\sim 6$ ), natomiast, co zaskakujące - asymetrie strumienia całkowitego są o wiele większe. Jeszcze większe różnice, niż te wyżej opisane, występują w stosunku do płatów zewnętrznych. Wygląda to w ten sposób, że dla zewnętrznej struktury to południowy płat porusza się w naszym kierunku, a w przypadku wewnętrznej struktury – przeciwnie: to północna struktura przemieszcza się do nas. Jedną z możliwych interpretacji tego faktu może być wewnętrzna asymetria w dżetach po dwóch stronach centralnego AGNu. Nie jest to jednak powszechnie akceptowana hipoteza, jednakże była już wcześniej proponowana w literaturze w przypadku pewnych asymetrycznych radioźródeł (np. Icke, 1982, ApJ, 265, 648; Wang i in., 1992, ApJ, 390, 46). Ponadto, inaczej niż w przypadku większości starych płatów dla obiektów restartujących, w południowym zewnętrznym płacie 4C02.27 widoczna jest gorąca plama. Z prostych (geometryczno-dynamicznych) szacunków wynika, że jej obecność oraz równoczesne istnienie centralnej młodej struktury determinuje bardzo krótki czas przerwy ( $< 4$  miliony lat) w aktywności centralnego AGNu. W większości do tej pory badanych radiogalaktykach restartujących o dużych megaparsekowych rozmiarach (np. J1453+3308, Konar i in., 2006, MNRAS, 372, 693 2006; Kaiser i in., 2000, MNRAS, 315, 381) czas „uśpienia” AGNu jest zdecydowanie dłuższy.

[H9] *W tej publikacji rozważamy hipotezę zakładającą, że charakterystyczna struktura radiowa największej ( $\sim 5$  Mpc) znanej obecnie radiogalaktyki J1420-0545 może być wynikiem istnienia wcześniejszej fazy aktywności dżetowej tego obiektu.*

Radioźródło J1420-0545 zostało odkryte w 2008 roku (Machalski i in., 2008, ApJ, 679, 149). Jest ono stowarzyszone z galaktyką położoną na przesunięciu ku czerwieni  $z=0.3067$ , a jego rozciągłość kątowna na niebie wynosi 17.4 minut łuku, co odpowiada rozmiarowi liniowemu 4.69 Mpc (przy parametrach:  $\Omega_m = 0.27$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.73$ ,  $H_0 = 71 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ). Generalnie jego struktura radiowa charakteryzuje się dużą liniowością (odstępstwo od liniowości wynosi  $\sim 1.3^\circ$ ) i symetrią długości obu płatów (stosunek ich długości wynosi 1.08). Szczególną cechą morfologiczną tego obiektu jest duży stosunek długości podłużnej do poprzecznej łobów, osiągający wartość  $12 \pm 3$ . Standardowo, przeciętne stosunki rozmiarów łobów dla większości radiogalaktyk osiągają wartości rzędu kilku. Natomiast duże stosunki rozmiarów łobów są charakterystyczne dla wewnętrznych płatów radiogalaktyk restartujących. Przykładowo dla obiektu J1548-3216 (opisywanego wcześniej w pracy [H6]) stosunek ten dla płatów zewnętrznych wynosi  $2.9 \pm 0.5$ , a dla wewnętrznych  $11 \pm 4$ . Ta charakterystyczna i opisana wyżej cecha J1420-0545 oraz zdobyte wcześniej doświadczenia wynikające z badań radiogalaktyk restartujących legły u podstawy wysuniętej przez nas hipotezy, zakładającej, że widoczne wąskie symetryczne płaty radiowe nie ekspandują w typowym ośrodku IGM, a - w kokonie plazmy o małej gęstości. Kokon ten uformował się w wyniku wcześniejszej fazy aktywności dżetowej galaktyki macierzystej J1420-0545. Potwierdzenie tej hipotezy mogłoby nastąpić w wyniku wykrycia na mapach radiowych o niskiej częstotliwości dyfuzyjnego kokonu o stromym widmie radiowym. Niestety, na uzyskanych nowych mapach nie udało się z detektować kokonu. Jednakże były one podstawą wieloczęstotliwościowej analizy dynamicznej, która umożliwiła estymowanie radiowej jasności powierzchniowej i wyznaczenie górnego limitu

strumienia dla hipotetycznego kokonu.

Wykonałem obserwacje J1420-0545 na 329 i 617 MHz interferometrem GMRT oraz na 4860 MHz interferometrem VLA. Stały się one podstawą modelowania dynamicznego (szczegóły w [H4]), które pozwoliło wyliczyć, m.in. moc dżetu, gęstość ośrodka zewnętrznego w pobliżu jądra, wiek płatów i indeks spektralny wstrzyknięcia  $\alpha_{inj}$ . Prócz estymacji parametrów J1420-0545 przeprowadziłem jeszcze podobne dla trzech gigantycznych radiogalaktyk: J0041+3224, J1453-3308 i J1548-3216, które dodatkowo są obiektami o wielokrotnej aktywności dżetowej i posiadają dwie pary płatów. Otrzymałem nieduży wiek J1420-0545 ( $\sim 35$  mln. lat), dużą prędkość ekspansji  $0.2c$  i bardzo małą gęstość ośrodka zewnętrznego  $\sim 2 \times 10^{-31}$  g cm<sup>-3</sup>. Dane te potwierdziły podejrzenie o ewolucji tego obiektu w bardzo rzadkim ośrodku. Mała gęstość może być związana z istnieniem w tym obszarze „dziury” (ang. void) pozbawionej galaktyk i IGM o przeciętnych parametrach. Za stworzenie takiego rzadkiego IGM może też być „odpowiedzialna” wielkoskalowa aktywność dżetowa i „wypchnięcie” pierwotnego IGM przez loby radiogalaktyki. Otrzymałem parametry hipotetycznego kokonu, będącego pozostałością wcześniejszej aktywności. Jego wiek powinien być rzędu 100 milionów lat, a całkowity strumień na częstotliwości  $\sim 300$  MHz być rzędu 300 mJy. Obecne instrumenty (np. Low-Frequency Array [LOFAR] lub zmodernizowany teleskop VLA) działające na niskich częstotliwościach mogłyby obserwacyjnie potwierdzić lub wykluczyć istnienie takiego kokonu. Obecnie redukuję dane pochodzące z mojego projektu obserwacyjnego VLA (VLA/14B-156) na 300 MHz, który zrealizowany został na przełomie 2014/2015 roku.

[H10] *Publikacja zawiera ogólne podsumowanie wiedzy o obiektach, które wykazują cechy wielokrotnej aktywności.*

W pracy tej opisaliśmy ogólny stan wiedzy o radioźródłach z wielokrotnymi stanami aktywności dżetowej do końca 2009 roku. Przedstawiamy podstawowe własności dwudziestu dwóch obiektów tego typu. Większość z nich posiada małe przesunięcia ku czerwieni. Brak odległych obiektów wiąże się prawdopodobnie z trudnościami (małe rozmiary kątowe i jasności) w dostrzeganiu ich w istniejących przeglądach nieba, a nie ich fizycznego braku we wcześniejszych epokach kosmologicznych. Rozmiary struktur wahają się w granicach od  $\sim 100$  kpc do ponad 1 Mpc. Gigantyczne struktury dominują na tej liście. Nie świadczy to o braku obiektów restartujących o niewielkich rozmiarach, ale jest raczej efektem selekcji – łatwiej zaobserwować wielokrotne loby w bardziej rozciągniętych obiektach. Z drugiej strony, mechanizm cyklicznej aktywności może być przyczyną dużych rozmiarów galaktyk restartujących – płaty z kolejnych cykli ekspandują szybciej, gdyż znajdują się w ośrodku o mniejszej gęstości niż pierwotny IGM. Na liście znajduje się jeden przykład z płatami pochodzącymi z trzech cykli aktywności. Dziś wiemy, że jest jeszcze jeden podobny przypadek (J1409-0302; Hota i in., 2011, MNRAS, 417L, 36). Wśród wymienionych obiektów jest tylko jeden kwazar (opisany szczegółowo w pracy [H8]). Podajemy również kilka znalezionych przez nas przykładów kwazarów - kandydatów na obiekty restartujące. Obecnie posiadamy również dowody na to, że J0746+4526 jest także kwazarem typu podwójno-podwójnego (Nandi i in., 2014, ApJ, 789, 16). Dyfuzyjne rozległe płaty niskoenergetycznych elektronów z wcześniejszych epok aktywności mają strome widma synchrotronowe i tracą efektywnie energię w odwrotnym procesie Comptona (oddziaływując z fotonami promieniowania relikowego). W związku z tym pokazujemy, że obserwacje radiowe na niskich częstotliwościach i głębokie detekcje w zakresie rentgenowskim są przydatnymi narzędziami w poszukiwaniu i badaniu tego typu obiektów. Ponadto, głębokie obserwacje rentgenowskie radiogalaktyk typu podwójno-podwójnego są również nieocenione w wyznaczaniu parametrów ośrodka, w którym one ekspandują (gęstość, ciśnienie), co z kolei może wyjaśnić mechanizmy tworzenia się szoków i gorących plam w wewnętrznych płatach.

#### 4c4. Uwagi końcowe:

Nowoczesne radiointerferometry operują na niskich częstotliwościach i posiadają duże zdolności rozdzielcze oraz dynamikę (jednoczesne dostrzeganie bardzo jasnych i bardzo słabych obiektów). Do tych instrumentów należą, m.in. LOFAR, Long Wavelength Array (LWA), Murchison Widefield Array (MWA), Australian Square Kilometre Array Pathfinder (ASKAP), Karoo Array Telescope (MeerKAT) i w dalszej perspektywie - Square Kilometre Array (SKA). Stwarzają one idealne narzędzia do poszukiwania i badania wielokrotnej aktywności dżetowej AGNów. Znaczne zwiększenie ilości obiektów restartujących oraz ich wieloczęstotliwościowe mapy radiowe w połączeniu z wypracowanymi już i wyżej wymienionymi narzędziami pozwolą na lepsze poznanie mechanizmów wznawiania aktywności centralnej radiogalaktyk.

## 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych:

Niżej opisuję moją działalność naukową, przed i po uzyskaniu stopnia doktora.

### 5a. Osiągnięcia w pracy naukowej przed uzyskaniem stopnia doktora:

Studia astronomii rozpocząłem na Wydziale Matematyki i Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie w 1991 roku. Pięć lat później, pod kierunkiem prof. Jerzego Machalskiego, napisałem i obroniłem pracę magisterską zatytułowaną *Cosmological evolution of radio sources at high redshifts*. Praca dotyczyła ewolucji kosmologicznej radiogalaktyk. Od kilku dekad wiadomo było, że w przeszłości radioźródła występowały częściej (tzw. ewolucja gęstości) lub były jaśniejsze (tzw. ewolucja jasności) niż obecnie. W zliczeniach radiogalaktyk maksimum ich występowania przypada na przesunięciu ku czerwieni  $z \sim 1.5$ . Zaimplementowałem dwa modele ewolucji, tj. Condon (1984, ApJ, 287, 461) oraz Dunlopa i Peacocka (1990, MNRAS, 247, 19). W oparciu o dane obserwacyjne skompletowane dla różnych przeglądów radiowych testowałem wyżej przedstawione modele i szacowałem ich parametry. Wyniki mojej pracy ukazały się w dwóch publikacjach konferencyjnych (Jamrozy, 1997, AcA, 23, 251; Machalski, Jamrozy, 1998, ASSL, 226, 191).

Po obronie pracy magisterskiej, w październiku 1996 roku rozpocząłem roczny staż w Zakładzie Astronomii Gwiazdowej i Pozagalaktycznej Obserwatorium Astronomicznego UJ w Krakowie, by następnie w 1997 roku podjąć tu studia doktoranckie. Podczas stażu i studiów kontynuowałem badania nad ewolucją radiogalaktyk pod kierunkiem prof. Machalskiego. Pracowałem nad modelem niezależnej ewolucji obiektów typu FRI i FRII opisanym w pracy Jackson i Wall (1999, MNRAS, 304, 160). Wiele czasu poświęciłem skompletowaniu odpowiednio licznych próbek radiogalaktyk o rozciągniętych i zwartych strukturach. Posługiwałem się mapami głównie z przeglądów NVSS i FIRST oraz WENSS. Jednym z ważniejszych osiągnięć, przedstawionym w rozprawie doktorskiej, było dostrzeżenie i udowodnienie tego, że część obiektów typu FRI, podobnie jak FRII, też ewoluje kosmologicznie. Wyniki moich badań zostały opublikowane w kilku pracach konferencyjnych (np. Jamrozy, Machalski, 2001, A&AT, 2001, 339) oraz w pracy recenzowanej (Jamrozy, 2004, A&A, 419, 63).

Niejako ubocznym produktem przeglądania map, klasyfikowania obiektów i kompletowania próbek różnego typu radioźródeł były badania gigantycznych radioźródeł. Pierwszym odkrytym przeze mnie na mapie NVSS i FIRST bardzo rozciągniętym obiektem był GB2 0909+353 (rozciągłość na niebie  $\sim 6.3$  minut łuku; Jamrozy, Machalski, 1999, AcA, 49, 181). Następnym odkrytym gigantem był J1343+3758 (rozciągłość na niebie  $\sim 11.3$  minut łuku; Machalski, Jamrozy, 2000, A&A, 363L). Zastosowana przeze mnie nowatorska metoda przeszukiwania map zaowocowała odkryciem kilkudziesięciu gigantycznych radiogalaktyk położonych na obszarze 0.47 sr nieba północnego (Machalski, Jamrozy, Zola, S., 2001, A&A, 371, 445). Metoda ta była również z powodzeniem stosowana do poszukiwania gigantów na niebie południowym (Kozieł-Wierzbowska, D., 2008, Rozprawa Doktorska, Uniwersytet Jagielloński).

## 5b. Osiągnięcia w pracy naukowej po uzyskaniu stopnia doktora:

W lipcu 2002 roku, po uzyskaniu stopnia doktora, rozpocząłem staż podoktorski w grupie radioastrofizycznej prof. Ulricha Kleina w Argelander-Institut für Astronomie, Universität Bonn (Niemcy). Na stażu przebywałem do października 2004 roku. Podczas pobytu w Bonn zajmowałem się wieloczęstotliwościowym badaniem rozciągniętych struktur radiowych (tj. radiogalaktykami oraz halo i reliktyami radiowymi w gromadach galaktyk). Na stażu zaznajomiłem się, m.in. z wykonywaniem obserwacji pojedynczą anteną (100-m radioteleskopem w Effelsbergu) oraz techniką analizy wieloczęstotliwościowej i analizą wieku spektralnego radiogalaktyk. Pobyt w Bonn zaowocował szeregiem prac (np. Jamrozy, Klein, Mack, Gregorini, Parma, *Spectral ageing in the relic radio galaxy B2 0924+30*, 2004, *A&A*, 427, 79; Jamrozy, Machalski, Mack, Klein, *Ageing analysis of the giant radio galaxy J1343+3758*, 2005, *A&A*, 433, 467) oraz kontynuowaną do dziś współpracą naukową z prof. U. Kleinem i dr K.-H. Mackiem. Po powrocie do Krakowa i objęciu posady asystenta, a później adiunkta w Obserwatorium Astronomicznym UJ zajmowałem się badaniem gigantycznych radiogalaktyk. Nową działalnością było rozpoczęcie prac nad obiektami, które wykazują cechy wielokrotnej aktywności dżetowej. Poszukiwałem dostępu do obserwacji radiowych na niskich częstotliwościach. Tak rozwinęła się moja współpraca z prof. D.J. Saikia i dr C. Konareem z National Centre for Radio Astrophysics (NCRA-TIFR) z Pune (Indie). NCRA posiada interferometr radiowy działający na częstotliwościach 150 – 1400 MHz, którym od 2005 roku wielokrotnie wykonywałem pomiary. W ramach tej współpracy powstało wiele publikacji, wchodzących również w skład mojej habilitacji.

Od sześciu lat należę do polskiego zespołu POLFAR, który postawił sobie za zadanie wybudowanie w Polsce trzech stacji LOFAR. Byłem pierwszym nieformalnym sekretarzem POLFAR-u. Biorę również udział w dwóch panelach naukowych zajmujących się przeglądami nieba (LOFAR Surveys KSP) i polami magnetycznymi (LOFAR Magnetic KSP). Pierwsza praca LOFAR-u, w której brałem udział, a dotycząca badań obiektu 3C295 już się ukazała (van Weeren, i in.. 2014, *ApJ*, 793, 82), a kilka kolejnych jest w trakcie opracowania (Shulevski i in.).

Od 2010 roku zajmuję się również badaniami w zakresie bardzo wysokich energii (TeV). Należę do Konsorcjum High Energy Stereoscopic System (H.E.S.S.) oraz Cherenkov Telescope Array (CTA). W ramach projektu H.E.S.S. zajmuję się badaniami radiowymi obiektów promieniujących w zakresie gamma. Przez kilka lat kierowałem jego sekcją radiową w ramach zespołu MWL (ang. multiwavelength). Ostatnio zajmuję się również badaniem natury galaktyk nieaktywnych Arp143 (Nikiel-Wroczyński, Jamrozy, Soida, Urbanik, 2014, *MNRAS*, 444, 1729) i NGC4490 (Nikiel-Wroczyński i in., w przygotowaniu).

Moje badania były i są wspierane przez granty badawcze Komitetu Badań Naukowych i Narodowego Centrum Nauki.

## 5c. Plany na przyszłość:

Dynamiczny rozwój infrastruktury radiowej w Europie i na świecie otwiera nowe zakresy okna EM do badań astronomicznych oraz stwarza dobre warunki dla przyszłego rozwoju tej dziedziny nauki, także w Polsce.

Chciałbym kontynuować rozpoczęte już projekty badawcze, szczególnie te dotyczące radiogalaktyk z wielokrotną aktywnością dżetową. Ponieważ zagadnienie to jest bardzo obszerne, wymaga analiz nie tylko w zakresie radiowym, ale także innych, np. optycznym, rentgenowskim. Przykładowo, określenie gęstości ośrodka, w którym rozchodzą się dżety z pierwotnej i wtórnej fazy aktywności, wydaje się zagadnieniem kluczowym, a jeszcze nikt do tej pory nim się nie zainteresował (wieloczęstotliwościowa polaryzacja radiowa, promieniowanie rentgenowskie). Wymaga ono współdziałania specjalistów z wielu dziedzin astrofizyki.

Zalążek takiej grupy stanowi zespół badawczy, którym kieruję w ramach projektu Narodowego Centrum Nauki. Rozpocząłem już w tej kwestii pracę ze studentami. Bardziej efektywna wydaje się być przyszła współpraca z doktorantami. Powinna ona zaowocować stworzeniem przeze mnie i kierowaniem pierwszą polską grupą badawczą zajmującą się ewolucją radiogalaktyk. Jej utrzymanie będzie opierać się głównie na finansowaniu w ramach krajowych i zagranicznych grantów.

Planuję również dalsze zaangażowanie w międzynarodowe projekty radioastronomiczne, tj. LOFAR (POLFAR) oraz w dalszej perspektywie - SKA. Dalsza współpraca w dziedzinie astrofizyki wysokich energii (H.E.S.S., CTA) wydaje mi się także obiecująca.

Chciałbym, by polscy radioastronomowie (głównie z ośrodków krakowskiego i toruńskiego) zacieśnili współpracę i stworzyli jednolitą grupę/organizację, np. pod nazwą Narodowego Centrum Radioastronomii. Jej zadaniem byłaby koordynacja krajowych projektów radioastronomicznych, utrzymanie istniejącej i budowa nowej infrastruktury badawczej oraz angażowanie się w wielkie projekty międzynarodowe wymagające dużego zaangażowania intelektualnego oraz znacznych nakładów finansowych na poziomie ogólnopolskim.

#### 6. Dane bibliometryczne:

Łączna liczba cytowań:

według Web of Science – 890 (722 bez autocytaowań)

według ADS - 1234

Łączny Impact Factor publikacji po 2003 roku: 416.57

Indeks Hirscha:

według Web of Science - 18

według ADS - 21

Dane te uzyskano 30.01.2015 roku. Dla publikacji z 2014 i 2015 roku przyjęto Impact Factor czasopism z 2013 roku.

