

Załącznik 2.

Autoreferat

1. Imię i Nazwisko: Wojciech Lewandowski

2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe:

2004 doktor nauk fizycznych, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu,
rozprawa doktorska: *Obserwacje pulsarów radioteleskopami w Piwnicach i Arecibo*,
promotor: prof. A. Wolszczan

1997 magister, specjalność Astronomia, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu,
praca magisterska: *Chronometraż pulsarów 32-metrowym radioteleskopem obserwatorium w Piwnicach*,
promotor: prof. A. Wolszczan.

3 . Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych:

1997-2004 studia doktoranckie, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu,

2004/2005 Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, Centrum Astronomii, asystent,

2005/2006 Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, Centrum Astronomii, adiunkt

2006 - 2015, Uniwersytet Zielonogórski, Wydział Fizyki i Astronomii, Instytut Astronomii - adiunkt,

2015 - Uniwersytet Zielonogórski, Wydział Fizyki i Astronomii, Instytut Astronomii - starszy specjalista naukowo-techniczny,

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:

Ograniczenia obserwacyjne na modele zjonizowanego ośrodka międzygwiazdowego uzyskane za pomocą badań sygnału pulsarów radiowych.

4b . Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego:

H1. Lewandowski, W., Kijak, J., Gupta, Y., Krzeszowski, K.,
Diffraction and refractive timescales at 4.8 GHz in PSR B0329+54
2011, *Astronomy and Astrophysics*, 534, A66

H2. Daszuta, M., Lewandowski, W., Kijak, J.,
Scintillation observations of PSR B0823+26
2013, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 436, 2492

H3. Lewandowski, W., Dembska, M., Kijak, J., Kowalińska, M.,
Pulse broadening analysis for several new pulsars and anomalous scattering
2013, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 434, 69

- H4.** Lewandowski, Kowalińska, M., Kijak, J.,
The analysis of the largest sample of multifrequency pulsar scatter time estimates
2015, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 449, 1570
- H5.** Lewandowski, W. Rożko, K., Kijak, J., Bhattacharyya, B., Roy, J.,
The study of multi-frequency scattering of 10 radio pulsars
2015, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 454, 2517
- H6.** Lewandowski, W. Rożko, K., Kijak, J., Melikidze, G.I.,
Thermal Absorption as the Cause of Gigahertz-peaked Spectra in Pulsars and Magnetars
2015, The Astrophysical Journal, 808, Issue 1, article id. 18

4c. Omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników wraz z przedstawieniem ich ewentualnego wykorzystania.

Od momentu uzyskania przeze mnie tytułu doktora nauk fizycznych opublikowałem około 30 publikacji naukowych (z czego 15 w czasopismach recenzowanych) i wszystkie one dotyczyły wyników obserwacji i analiz sygnału odbieranego od pulsarów radiowych. W niniejszym opracowaniu skupię się na sześciu recenzowanych publikacjach które wchodzi w skład prezentowanego osiągnięcia naukowego i dotyczą jednego z aspektów badań astrofizyki pulsarów, którym jest oddziaływanie promieniowania radiowego pulsarów z materią stanowiącą tzw. ośrodek międzygwiazdowy, a w szczególności z jego zjonizowaną częścią. Przedstawione poniżej publikacje prezentują różne metody badań efektów związanych z propagacją fal radiowych w zjonizowanym ośrodku - od zjawisk rozpraszania fal, poprzez tzw. scyntyłacje międzygwiazdowe do zjawisk związanych z absorpcją fal radiowych w procesach swobodno-swobodnych zachodzących pomiędzy elektronami występującymi w zjonizowanej materii. Wraz ze współpracownikami zaplanowaliśmy i zrealizowaliśmy liczne projekty obserwacyjne mające na celu zbadanie tych zagadnień - w większości z tych projektów byłem głównym badaczem (PI). Obserwacje prowadzone były głównie za pomocą trzech instrumentów: 32-metrowego radioteleskopu Centrum Astronomii UMK w Piwnicach pod Toruniem, 100-metrowego radioteleskopu w Effelsbergu k. Bonn (Niemcy) oraz interferometru Giant Meterwave Radio Telescope należącego do National Centre for Radio Astronomy w Pune (Indie). W wypadku większości projektów nasze dane obserwacyjne zostały uzupełnione o wyniki archiwalne znalezione w pracach opublikowanych wcześniej przez innych autorów. Dane obserwacyjne przeanalizowane zostały jednocześnie używanymi metodami powszechnie stosowanymi w wypadku tego typu badań, z wykorzystaniem metod analizy ciągów czasowych, modelowania profili średnich oraz widm pulsarów radiowych. Badania przedstawione poniżej przeprowadzone zostały w dużej mierze w ramach projektów badawczych Komitetu Badań Naukowych oraz Narodowego Centrum Nauki, w których byłem jednym z wykonawców.

Głównym rezultatem moich badań jest analiza wyników wieloczęstotliwościowych obserwacji najliczniejszej grupy pulsarów jaka do tej pory została przebadana pod kątem właściwości zjawisk rozpraszania i scyntyłacji międzygwiazdowych. Uzyskane przeze mnie wyniki stanowią największy jak do tej pory zbiór ograniczeń obserwacyjnych dotyczących właściwości zjonizowanej części ośrodka międzygwiazdowego. Rezultaty moich badań posłużą w niedalekiej przyszłości do stworzenia nowego modelu rozkładu swobodnych elektronów w Galaktyce - obecnie używany model (NE2001, Cordes & Lazio 2002) nie uwzględnia bowiem wielu nowych i istotnych faktów obserwacyjnych, które pojawiły się w ciągu prawie 15 lat od jego opublikowania.

Wpływ zjawisk rozpraszania i scyntyłacji międzygwiazdowych obserwowanych w sygnałach pulsarów radiowych nie był do tej pory dogłębnie badany w aspekcie obserwacji na wielu częstotliwościach - dotychczasowe próby tego typu analiz zamykały się do niewielkich grup obiektów. Studia takie są jednak niezmiernie użyteczne dla wszystkich form obserwacji pulsarów radiowych, w tym szczególnie dla projektów badawczych prowadzonych z wykorzystaniem najnowszych instrumentów pracujących na niskich częstotliwościach radiowych (takich jak LOFAR, MWA czy LWA). Na tych częstotliwościach

(poniżej 1 GHz) efekty związane z rozpraszaniem sygnału pulsarów są bowiem bardzo istotne. Wpływ moich badań na obserwacje prowadzone z użyciem tych instrumentów potwierdzają m.in. cytowania moich artykułów w publikacjach prezentujących wyniki z tych obserwatoriów (patrz np. Bilous i inni, (2015), oraz Stovall i inni, (2015)).

4c1. Motywacje Naukowe

Pulsary, czyli szybko rotujące gwiazdy neutronowe, obdarzone silnym polem magnetycznym wysyłają w regularnych odstępach impulsy promieniowania radiowego. Promieniowanie to propaguje się przez tzw. ośrodek międzygwiazdowy ulegając wpływowi kilku zjawisk które zmieniają jego charakter. Ponieważ moje badania dotyczyły wyłącznie obserwacji pulsarów na falach radiowych, skupię się na zjawiskach występujących w tym zakresie widma elektromagnetycznego. Zjawiska te są powodowane prawie wyłącznie przez zjonizowaną materię znajdującą się w przestrzeni międzygwiazdowej, a w szczególności przez swobodne elektrony znajdujące się w takiej materii. Do najważniejszych zjawisk należy Dyspersja Międzygwiazdowa (Manchester & Taylor, 1972, *Astrophysical Letters*, Vol. 10, p.67), wynikająca z faktu że fale radiowe propagujące się przez materię zjonizowaną poruszają się z prędkością zależną od długości fali, przy czym fale o mniejszej długości (wyższej częstotliwości) poruszają się szybciej i docierają do obserwatora wcześniej niż fale radiowe o większej długości. Bezpośrednie obserwacje tego zjawiska można prowadzić w zasadzie wyłącznie z użyciem pulsarów radiowych. Krótkotrwałe impulsy radiowe wysyłane przez te obiekty w jednakowym czasie na wszystkich częstotliwościach docierają do obserwatora z różnym opóźnieniem, w wyniku czego puls promieniowania najpierw widoczny jest na wyższych częstotliwościach radiowych a dopiero po pewnym czasie na częstotliwościach niższych. Różnica tzw. czasów przyjscia pulsów na różnych częstotliwościach pozwala na określenie wielkości nazywanej Miarą Dyspersji (ang. Dispersion Measure, DM), która jest równa gęstości kolumnowej elektronów wzdłuż całej drogi propagacji promieniowania. Wielkość ta zależy od gęstości materii zjonizowanej oraz od odległości do pulsara, a w wypadku odległych obiektów, do których niemożliwe jest zmierzenie odległości metodami standardowo używanymi w astronomii, pozwala na oszacowanie odległości przy użyciu modelu rozkładu swobodnych elektronów w Galaktyce (takich jak model NE2001, Cordes & Lazio 2002).

Wielkość miary dyspersji zależy wyłącznie od całkowitej ilości (lub średniej gęstości) elektronów wzdłuż tzw. linii widzenia pulsara (ang. line-of-sight, LOS), natomiast zjawiska rozpraszania sygnału radiowego pulsarów oraz scyntytacji międzygwiazdowych wynikają z istnienia fluktuacji gęstości zjonizowanej materii. Zjawisko rozpraszania promieniowania pulsarów zostało zaobserwowane wkrótce po odkryciu tej klasy obiektów (Scheuer, 1968, *Nature*, 218, 920). Wynika ono z faktu interakcji fotonów ze swobodnymi elektronami, która powoduje zmianę kierunku ich ruchu. W efekcie dociera do nas promieniowanie nie tylko po najkrótszej geometrycznie drodze (linii prostej), ale także promieniowanie które nie zostało wysłane w kierunku obserwatora, ale na skutek rozproszenia zmieniło swój kierunek i dotarło do niego. To rozproszone promieniowanie przebywa jednak drogę minimalnie dłuższą, przez co dociera z niewielkim opóźnieniem. W wyniku zjawiska rozproszenia obserwator zauważy poszerzenie pulsu, obserwowany profil pulsu uzyskuje tzw. ogon rozproszeniowy, odpowiadający w przybliżeniu funkcji eksponencjalnego zaniku¹. Jak przewiduje obecna teoria rozpraszania (patrz np. przeglądowy artykuł Rickett, 1990, *ARA&A*, 28, 56) jest silnie zależne od częstotliwości obserwacyjnej. Charakterystyczna skala czasowa poszerzenia pulsu (tzw. czas rozproszenia, τ_d) zależy od częstotliwości jak $\tau_d \sim \nu^{-\alpha}$, przy czym indeks widmowy α (poprawniej nazywany indeksem skalowania rozpraszania) jest rzędu $\alpha = 4$.

Zjawisko scyntytacji międzygwiazdowych jest pośrednim wynikiem występowania rozpraszania w ośrodku międzygwiazdowym (patrz m.in Rickett 1990, *ARA&A*, 28, 56). Jeżeli rozważymy front fa-

¹z matematycznego punktu widzenia obserwowany profil jest konwolucją profilu własnego pulsara i tzw. funkcji odpowiedzi (nazywanej też funkcją poszerzenia pulsu), która jest w najprostszym przypadku przyjmowana w postaci funkcji eksponencjalnego zaniku

lowy impulsów wysyłanych przez pulsara, to w wystarczająco dużej odległości od źródła stanowi on falę płaską. Taki front falowy, napotykając obszar fluktuacji gęstości elektronów ulega zaburzeniu², i jego dalsza propagacja powoduje wystąpienie zjawisk refrakcji, dyfrakcji i interferencji sygnału radiowego, co powodować może wzmocnienie lub wygaszenie obserwowanego promieniowania. Ponieważ za wielkość zaburzeń odpowiada zjawisko rozpraszania, to w efekcie charakter obserwowanych scyntytacji również bardzo silnie zależy od częstotliwości obserwacyjnej. Szczególnie silny związek występuje pomiędzy czasem rozpraszania a tzw. pasmem dekorelacji ($\Delta\nu_d$), opisującym zakres częstotliwości obserwacyjnych w którym obserwowana zmienność strumienia wynikająca ze scyntytacji jest ze sobą skorelowana). Teoria rozpraszania i scyntytacji międzygwiazdowych przewiduje, że te dwie wielkości są ze sobą związane prostą zależnością: $2\pi \tau_d \Delta\nu_d = C_1$, gdzie stała C_1 zazwyczaj przyjmowana jest jako bliska jedności.

Badanie zależności parametrów rozpraszania i scyntytacji od częstotliwości obserwacyjnej pozwala uzyskać informacje na temat właściwości ośrodka międzygwiazdowego, a w szczególności występujących w nim fluktuacji gęstości wynikających z jego turbulentnej natury. Najczęściej do analizy używa się najprostszej z możliwych geometrii tych zjawisk, tzw. modelu cienkiego ekranu³ - modelu w którym wszystkie fluktuacje gęstości materii zjonizowanej zgrupowane są w niewielkim obszarze o rozmiarze dużo mniejszym od całkowitej drogi propagacji promieniowania⁴. W takim wypadku obserwowany indeks skalowania częstotliwościowego dla czasu rozproszenia (i wielkości pasma dekorelacji) jest ściśle zależny od widma przestrzennego fluktuacji energii w ośrodku międzygwiazdowym, które daje się w przybliżeniu opisać jako:

$$P_{n_e}(q) = C_{n_e}^2 q^{-\beta},$$

gdzie P_{n_e} opisuje ilość energii zawartej we fluktuacjach o wielkości odpowiadającej liczbie falowej q , a wielkość $C_{n_e}^2$ nazywana jest siłą fluktuacji. Według teorii rozpraszania i scyntytacji (Romani, Narayan & Blandford, 1986) indeks widmowy β występujący w powyższym równaniu jest ściśle związany z obserwowanym indeksem skalowania częstotliwościowego dla czasu rozproszenia i pasma dekorelacji: $\alpha = 2\beta/(\beta - 2)$. Teoria turbulencji w ośrodku międzygwiazdowym zakłada że indeks β jest w zakresie od 11/3 (tzw widmo Kołmogorowa) do wielkości 4.3. Przy założeniu widma Kołmogorowa otrzymujemy oczekiwaną wartość indeksu skalowania rozpraszania i scyntytacji $\alpha = 4.4$.

Oszacowania wielkości indeksu skalowania pozwalają więc na uzyskanie informacji na temat charakteru fluktuacji gęstości i turbulencji występujących w ośrodku międzygwiazdowym. Należy podkreślić, że tego typu badania możliwe są do prowadzenia w praktyce wyłącznie za pomocą obserwacji pulsarów - pulsacyjny charakter ich promieniowania pozwala oszacować udział w obserwacjach zjawisk, które dla źródeł promieniowania ciągłego są niewykrywalne. Mimo tego ten aspekt astrofizyki pulsarów nie był do tej pory dogłębnie badany. Większość studiów zjawiska rozpraszania i scyntytacji w obserwacjach pulsarów zamykała się do obserwacji niewielkiej grupy obiektów, lub obserwacji większych ilości pulsarów ale na wybranych pojedynczych częstotliwościach radiowych. Do projektów wyróżniających się pod tym względem zaliczyć należy obserwacje zaprezentowane przez Cordes, Weisberg i Boriakoff (1985), Ramachandran i inni (199), Bhat i inni (2004). Dopiero jednak Loehmer i inni (2001,2004) podjęli się próby zebrania wszystkich wieloczęstotliwościowych obserwacji parametrów rozpraszania i scyntytacji - udało im się to dla zaledwie 27 obiektów. Przeanalizowali oni oszacowaną wielkość indeksu skalowania częstotliwościowego (czyli parametru opisującego zależność wielkości zjawiska rozpraszania od częstotliwości obserwacyjnej) dla omawianych zjawisk i zasugerowali, że o ile dla pulsarów o małej mierze dyspersji ($DM < 300 \text{ pc cm}^{-3}$) indeks skalowania jest zgodny z przewidywaniami opartymi na założeniu, że turbulencje w zjonizowanym ośrodku daje się opisać widmem Kołmogorowa, o tyle dla

²zjawisko to w swej naturze podobne jest do fenomenu migotania gwiazd w ziemskiej atmosferze

³analitycznie opracowane zostały także niektóre inne przypadki, np. gruby ekran, czy propagacja przez ośrodek o stałej gęstości

⁴model ten może wyglądać na uproszczony, ale w rzeczywistości największy wkład do obserwowanych zjawisk wnoszą obszary o ograniczonych rozmiarach - takie jak zjonizowane obszary HII, lub mgławice będące pozostałościami po supernowych - których rozmiar jest niewielki w porównaniu z odległościami do obserwowanych pulsarów

obiektów odleglejszych o większej wartości DM oszacowania indeksu skalowania wskazują na niezgodność z teorią: w zakresie modeli rozważanych przez Romani, Narayan & Blandford (1986) o różnych geometriach dopuszczalne są wartości indeksu α w zakresie od 4.0 do 4.4, natomiast z obserwacji najodleglejszych obiektów oszacowano w niektórych przypadkach wartość α mniejszą niż 3.0.

Podjąłem próbę zmiany sytuacji w tym temacie, gdyż wydało się mi dziwne, że spośród około 2500 znanych pulsarów radiowych tylko dla 27 wyznaczono wiarygodne wartości indeksów skalowania częstotliwościowego oraz innych parametrów zjawisk rozpraszania i scyntytacji międzygwiazdowych. W tym celu wraz ze współpracownikami skonstruowaliśmy metodologię badań: użyliśmy własnych obserwacji, przeprowadzonych w ramach innych projektów badawczych, oraz danych znalezionych w literaturze. W późniejszym czasie przeprowadziliśmy dedykowane projekty obserwacyjne (w których byłem głównym pomysłodawcą i „PI”), które miały i mają na celu poszerzenie naszej wiedzy w tym zakresie. Udało się nam powiększyć liczbę pulsarów dla których uzyskano wiarygodne oszacowania zależności rozpraszania i scyntytacji od częstotliwości do 64, czyli ponad dwukrotnie. Dodatkowo ulepszyliśmy (poprzez dodanie nowych obserwacji i pomiarów) ponad połowę oszacowań indeksu skalowania α dla pulsarów z próbki analizowanej przez Loehmer i inni. (2001, 2004).

Ostatnim aspektem dotyczącym propagacji fal radiowych od pulsarów, którym zajmowałem się w ramach moich badań, jest zjawisko absorpcji swobodno-swobodnej na wolnych elektronach w ośrodku międzygwiazdowym, a w szczególności na próbie wyjaśnienia tzw. widm typu gigahertz-peaked spectra (GPS) obserwowanych u niektórych obiektów (patrz Kijak i inni, 2011a, 2011b, 2013; Allen i inni, 2013, Dembska i inni, 2014, 2015; Pennucci i inni, 2015). Kształt widma wspomnianych obiektów jest specyficzny - o ile dla większości pulsarów ich widmo daje się opisać prostym widmem potęgowym (o średnim indeksie widmowym około -1.8 , Maron i inni, 2000), to w wypadku pulsarów typu GPS widma na częstotliwościach około 1 GHz ulegają załamaniu i zmianie indeksu widmowego na dodatni w zakresie niskich częstotliwości. Przeprowadziliśmy badania w celu sprawdzenia czy zjawisko termicznej absorpcji swobodno-swobodnej na wolnych elektronach w ośrodku międzygwiazdowym jest w stanie wyjaśnić obserwowane widma. Po przetestowaniu różnych scenariuszy okazało się, że nietypowe otoczenia niektórych pulsarów - w postaci pozostałości po wybuchach supernowych czy mgławic pulsarowych (ang. pulsar wind nebulae, PWN) - istotnie są w stanie zapewnić wystarczającą ilość absorpcji by „złamać” widmo pulsara i odwrócić jego przebieg na niskich częstotliwościach radiowych i to począwszy od częstotliwości od kilku GHz w dół (a nie jak wcześniej sądzono wyłącznie na bardzo niskich częstotliwościach, patrz np. Sieber, 1973). Wyniki naszego modelowania są w stanie wyjaśnić kształty widm pulsarów i radio-magnetarów typu GPS i dostarczyć nam informacji na temat gęstości i temperatury materii zjonizowanej w ich otoczeniach. Ta informacja jest bardzo trudna do uzyskania innymi metodami obserwacyjnymi.

Jak widać to z opisu zawartego powyżej, choć zajmuję się analizą danych obserwacyjnych pulsarów radiowych, to w moich badaniach używam tych obiektów jako specyficznych narzędzi służących do badania ośrodka międzygwiazdowego, jego właściwości i jego rozkładu w Galaktyce. Mam nadzieję, że prezentowane przeze mnie wyniki przyczynią się do poszerzenia naszej wiedzy o tym składniku Drogi Mlecznej, tym bardziej że prace te zostały już zauważone i są cytowane, także przez publikacje związane z nowoczesnymi projektami badawczymi prowadzonymi z użyciem nowo-powstałych instrumentów takich jak LOFAR czy LWA.

4c2. Metodologia badań

Obserwacje, których analiza złożyła się na przedstawione tutaj osiągnięcie badawcze zostały przeprowadzone dwoma z największych radioteleskopów na świecie - 100-metrowym teleskopem w Effelsbergu i interferometrem GMRT - oraz polskim 32 metrowym radioteleskopem Centrum Astronomii UMK. Dotyczyły one obserwacji profili średnich pulsarów uzyskiwanych poprzez integrację sygnału zgodną z okresem rotacji tych obiektów.

Obserwacje 32-metrowym radioteleskopem Centrum Astronomii UMK w Piwnicach przeprowa-

dzone zostały na częstotliwościach 1.7 i 4.8 GHz z użyciem maszyny pulsarowej PSPM2 (Konacki i inni, 1999), która jest w istocie szybkim, 64-kanałowym spektrometrem. Dane obserwacyjne w wypadku profili średnich poddawane były procedurze dedispersji (usuwania wpływu dyspersji międzygwiazdowej przez regulację opóźnień czasowych pomiędzy kanałami spektralnymi), lub - jak to miało miejsce w wypadku analizy scyntytacji międzygwiazdowych za pomocą metody widm dynamicznych - przez uzyskanie profilu średniego w każdym kanale spektralnym z osobna. Ilość energii w profilach średnich (z całego pasma lub z poszczególnych kanałów) kalibrowana była z użyciem diody szumowej do radioźródeł o znanym strumieniu energii.

Obserwacje z użyciem 100-metrowego radioteleskopu w Effelsbergu k. Bonn prowadzone były za pomocą systemu EPOS (Jessner, 1996) na częstotliwościach 1.4, 2.6, 4.8 i 8.5 GHz a ich wstępna analiza aż do uzyskania profilu średniego przebiegała podobnie jak to zostało opisane powyżej. W wypadku interferometru Giant Meterwave Radio Telescope instrument ten używany był w trybie pracy nazywanym „sieciami fazowanymi” (ang. phased array), tzn. formowania wirtualnego pojedynczego radioteleskopu poprzez dodawanie sztucznych opóźnień sygnału dla każdej z 30 anten teleskopu. Zsumowany sygnał był następnie przekazywany do systemu obserwacji pulsarów (patrz Gupta i inni, 2000, w ASP Conf. Series, 202, 277), gdzie poddawany był dedispersji i integracji sygnału w celu uzyskania profili średnich. W późniejszym czasie sprzętowy system obserwacji pulsarów zastąpiony został przez system software’owy GSB (GMRT Pulsar Backend, Roy i inni, 2010), aczkolwiek metody analizy sygnału nie uległy zmianie. Obserwacje prowadzone były za pomocą wszystkich odbiorników dostępnych dla teleskopu GMRT, czyli na częstotliwościach 150, 235, 325, 610 MHz i w zakresie 1060-1400 MHz.

Dalsza analiza danych obserwacyjnych zebranych w ramach przedstawionych tu badań opiera się głównie na oszacowaniu dwóch najistotniejszych parametrów badanych zjawisk: czasu rozpraszania w wypadku obserwacji poszerzenia pulsów, oraz pasma dekorelacji w przypadku obserwacji scyntytacji międzygwiazdowych.

Obserwowany profil pulsara jest wynikiem konwolucji jego profilu własnego, funkcji „odpowiedzi ośrodka” która opisuje zjawisko rozpraszania w ośrodku międzygwiazdowym (Ramachandran i inni, 1997), funkcji rozmycia dyspersyjnego, oraz funkcji opisującej odpowiedź używanego instrumentu. W wypadku nowoczesnych systemów używanych do odbioru i analizy sygnału radiowego pulsarów te dwa ostatnie czynniki są zazwyczaj zaniedbywalnie małe. Ponieważ profil własny pulsara na danej częstotliwości jest nieznany, w większości analiz jako profilu własnego (wzorcowego) używa się profili obserwowanych na wysokich częstotliwościach (na których efekty związane ze zjawiskiem rozpraszania są zaniedbywalne, patrz np. Loehmer i inni, 2001, 2004) lub też uproszczonych modeli analitycznych opisujących ten kształt. Następnie modeluje się obserwowany profil pulsara za pomocą konwolucji profilu wzorcowego (własnego) z określonymi przez teorię zjawiska funkcjami odpowiedzi ośrodka międzygwiazdowego. Dopasowanie modelowego profilu do zaobserwowanego kształtu profilu pulsara pozwala na oszacowanie wielkości czasu rozpraszania. Zestawienie uzyskanych w ten sposób wyników z różnych częstotliwości obserwacyjnych pozwala na określenie przebiegu zależności czasu rozpraszania od częstotliwości (czyli w praktyce indeksu skalowania α), a także na określenie parametrów opisujących bezwzględną wielkość rozpraszania, takich jak znormalizowany czas rozpraszania, oraz siłę fluktuacji ośrodka (C_{ne}^2). Ta metoda używana jest zawsze w wypadku tego typu analiz - patrz np. Loehmer i inni (2001, 2004) oraz H3, H4 ,H5.

Oszacowania pasma dekorelacji w wypadku scyntytacji międzygwiazdowych dokonać można w sposób pośredni - za pomocą pomiaru skal czasowych scyntytacji, w oparciu o teorię scyntytacji (Rickett, 1990) - tak jak pokazałem to w pracy H1, jak również bezpośredni, za pomocą analizy tzw. widm dynamicznych (Cordes, 1986; tak jak w H2). Niezależnie od użytej metody, oszacowanie tej wielkości na dwóch lub więcej częstotliwościach obserwacyjnych pozwala na określenie przebiegu zależności czasu rozpraszania od częstotliwości. Aby uwiarygodnić oszacowania indeksu skalowania dla rozpraszania i pasma dekorelacji przyjęta została reguła, iż za wiarygodne uznawać będziemy wyniki oparte na pomiarach odpowiednich wielkości na co najmniej trzech częstotliwościach radiowych; jest to minimalna ilość pomiarów która pozwala na realne określenie niepewności tego typu oszacowań. Dodatkowo podczas

wykonywania pomiarów czasu rozproszenia opieraliśmy się tylko na tych profilach pulsarów w których „ogon rozproszeniowy” był wyraźnie widoczny, aby w jak największym stopniu uniknąć efektów związanych z ewolucją kształtu profilu pulsara oraz z poszerzeniem pulsu na niskich częstotliwościach wynikającym z dipolowej geometrii obszaru emisji (ang. radius to frequency mapping, Kijak & Gil 2003).

W wypadku modelowania widm pulsarów typu GPS (praca H6) w naszym modelu zakładaliśmy, że pierwotne (własne) widmo pulsara daje się opisać prostą funkcją potęgową, natomiast obserwowane widmo uzyskiwane było jako efekt transferu promieniowania przez ośrodek absorbujący. Wielkość absorpcji określona została przez obliczenie grubości optycznej dla zjawiska termicznej absorpcji swobodno-swobodnej (Rohlf & Wilson 2004). Wielkość ta zależy jest od częstotliwości obserwacyjnej, ale także od temperatury absorbującej materii oraz jej gęstości i rozmiarów obszaru absorbującego (poprzez tzw. miarę emisji). Nasze modelowanie opierało się na regulacji wymienionych parametrów (w zakresie dopuszczalnym przez inne dane obserwacyjne) tak aby uzyskać widma z maksimum energii na częstotliwościach około 1 GHz, co obserwuje się u pulsarów i magnetarów typu GPS.

4c3 . Omówienie poszczególnych prac:

[H1] W pracy zostały przedstawione wyniki projektu obserwacyjnego, który w prowadziłem z użyciem 32-metrowego radioteleskopu Centrum Astronomii UMK w Piwnicach pod Toruniem. Projekt dotyczył monitorowania zmienności strumienia średniego pulsara PSR B0329+54 na częstotliwości 4.8 GHz. W ramach projektu przeprowadzono 20 sesji obserwacyjnych w czasie których pulsar obserwowany był przez przeciętnie 24 godziny non stop (przy czym najdłuższa sesja obserwacyjna obejmowała 5 dni ciągłych obserwacji). Celem tego projektu było wyznaczenie skal czasowych zjawiska scyntytacji międzygwiazdowych. Projekt ten był unikalny na skalę światową ze względu na całkowitą długość przeprowadzonych obserwacji (w sumie 35 tys. minut, lub ponad 24 dni obserwacji), ale również ze względu na długość ciągów czasowych pomiarów strumienia pulsara (od 1 do 5 dni). Dzięki temu przebadaliśmy zjawisko scyntytacji międzygwiazdowych w sposób niedostępny na niższych częstotliwościach radiowych poprzez jednoczesne wyznaczenie z tych samych obserwacji obu skal czasowych scyntytacji - dyfrakcyjnej i refrakcyjnej (patrz Rys.3 w pracy H1).

Scyntytacje dyfrakcyjne powodowane są przez zaburzenia gęstości materii międzygwiazdowej w skalach przestrzennych rzędu 10^6 do 10^8 metra, wynoszą typowo od kilku sekund do kilku minut (ta skala czasowa wzrasta z częstotliwością obserwacyjną) i charakteryzują się indeksem modulacji bliskim jedności (co oznacza m.in. że często powodują kompletne wygaszenie obserwowanego sygnału pulsara). Za scyntytacje refrakcyjne odpowiadają zaburzenia gęstości materii międzygwiazdowej o znacznie większych rozmiarach (10^{10} do 10^{13} metra), przez co ich skala czasowa (szczególnie na niższych częstotliwościach radiowych) jest bardzo długa i sięga miesięcy a nawet lat. W przeciwieństwie do skali dyfrakcyjnej wielkość refrakcyjnej skali czasowej spada z częstotliwością, i w wyniku przeprowadzonej analizy okazało się, że dla badanego obiektu na częstotliwości obserwacyjnej 4.8 GHz obie te skale są na bardzo bliskie sobie ($t_{diss} = 43$ minuty i $t_{riss} = 305$ minut). Dzięki temu udało się je zmierzyć jednocześnie, używając jednej metody, w tych samych ciągach czasowych strumieni gęstości promieniowania PSR B0329+54.

Wyznaczenie skal czasowych scyntytacji dyfrakcyjnych i refrakcyjnych wykonane zostało z użyciem metody funkcji struktury (Simonetti i inni, 1985), dzięki czemu wyznaczonych zostało wiele parametrów tego zjawiska, takich jak moc rozpraszania ($u = 2.67$), indeksy modulacji dla obu typów scyntytacji, skalę Fresnela - wielkość kluczową dla obserwowanego charakteru scyntytacji (w tym wypadku $r_F = 6.7 \times 10^8$ metra). W sposób pośredni wyznaczona została także wielkość pasma dekorelacji $\Delta\nu = 853$ MHz; niemożliwa do wyznaczenia w bezpośrednich pomiarach z obserwacji prowadzonych z użyciem maszyny pulsarowej PSPM2, której pasmo odbiorcze wynosi 192 MHz.

Wyniki uzyskane z tego projektu zostały zestawione z wcześniejszymi rezultatami obserwacji scyn-

tylacji PSR B0329+54, prowadzonymi na niższych częstotliwościach. Dodanie wyników uzyskanych na częstotliwości 4.8 GHz pozwoliło niemal potroić zakres częstotliwości dla którego przebadane zostały własności scyntylacji dla tego obiektu. Dzięki temu byliśmy w stanie dużo dokładniej wyznaczyć przebieg zależności parametrów scyntylacji od częstotliwości obserwacyjnej. W kontekście całokształtu moich badań nad zjawiskami rozpraszania sygnału radiowego i scyntylacji międzygwiazdowych dla pulsarów najważniejsze było określenie indeksu skalowania pasma dekoracji $\alpha = 3.89$. Wartość ta znacząco odbiega od przewidywań przy użyciu modelu cienkiego ekranu (patrz rozdział 4c1) i przy założeniu, że widmo turbulencji w ośrodku międzygwiazdowym powinno być opisywalne widmem Kołmogorowa - w takim przypadku indeks skalowania powinien mieć wartość $\alpha = 4.4$. PSR B0329+54 jest stosunkowo mało odległym pulsarem (około 1kpc) i mało prawdopodobne jest, że to geometria ośrodka wywołującego scyntylację odpowiedzialna jest za tę różnicę względem teoretycznych przewidywań. W związku z tym w pracy zasugerowałem, że najbardziej prawdopodobnym wyjaśnieniem jest to, że widmo turbulencji materii zjonizowanej wzdłuż tej linii widzenia bliższe jest tzw. widmu krytycznemu, które przewiduje $\alpha = 4.0$ dla $\beta = 4.0$ (Romani, Narayan & Blandford, 1986).

[H2] Praca przedstawia wyniki długoterminowego monitoringu strumienia średniego pulsara PSR B0823+26 na częstotliwości 1.7 GHz. Ten projekt obserwacyjny przeprowadziłem również z użyciem 32-metrowego radioteleskopu Centrum Astronomii UMK i maszyny pulsarowej PSPM2. W tym okresie pulsar obserwowany był w trakcie ponad 50 sesji obserwacyjnych z których każda trwała średnio około 10 godzin (w sumie zebrałem około 600 godzin danych obserwacyjnych). Każda z sesji obserwacyjnych podzielona była na 3-minutowe integracje w celu uzyskania profili średnich i pomiaru średniego strumienia energii. Serie czasowe pomiarów strumienia średniego przeanalizowane zostały za pomocą metody funkcji struktury (Simonetti i inni, 1985, ApJ 296, 46), co pozwoliło na wyznaczenie skali czasowej scyntylacji dyfrakcyjnych na $t_{diss} = 19.3$ minuty.

Pulsar okazał się również na tyle silnym źródłem, że możliwa była analiza danych z użyciem metody widm dynamicznych. Dla nie-dedispersowanych danych w każdym z 64 kanałów spektralnych maszyny pulsarowej PSPM2 (której pasmo wynosi łącznie 192 MHz) dokonaliśmy niezależnego pomiaru strumienia średniego. Wyniki pomiarów ze wszystkich kanałów po zestawieniu wszystkich 3-minutowych obserwacji przeprowadzonych w czasie jednej sesji posłużyły do stworzenia „mapy dynamicznych” - tzn. wykresów przedstawiających zmienność natężenia promieniowania odbieranego od pulsara jednocześnie w zależności od czasu i częstotliwości obserwacyjnej.

Analiza przeprowadzona tą metodą zaowocowała niezależnym wyznaczeniem skali czasowej scyntylacji dyfrakcyjnych (która okazała się identyczna z wynikami uzyskanymi z metody funkcji struktury), ale także przede wszystkim pozwoliła na bezpośrednie wyznaczenie pasma dekoracji scyntylacji $\Delta\nu = 81 \pm 3$ MHz.

Wyznaczone z danych zebranych w projekcie parametry scyntylacji zestawione zostały z wcześniej opublikowanymi wynikami obserwacji tego pulsara, by wyznaczyć przebieg ich zależności od częstotliwości obserwacyjnej. Podobnie jak w wypadku obserwacji pulsara PSR B0329+54 (patrz H1) okazało się, że uzyskane wyniki odbiegają od przewidywań wyznaczonych przy założeniu, że widmo fluktuacji gęstości ośrodka międzygwiazdowego da się opisać widmem Kołmogorowa ($\beta = 11/3$, patrz rozdział 4c1). W szczególności wynik uzyskany dla indeksu skalowania pasma dekoracji, $\alpha = 3.94 \pm 0.36$ jest bliższy tzw. modelowi krytycznego (patrz Romani, Narayan & Blandford, 1986), który dla widma fluktuacji z $\beta = 4.0$ przewiduje $\alpha = 4.0$.

Jak przedstawiłem w pracy, częściowo może być za to odpowiedzialne specyficzne położenie tego pulsara, w szczególności fakt, że znajduje się on tuż poza granicą tzw. Lokalnego Bąbla (Local Bubble, patrz Bhat, Gupta & Rao, 1998) i na zewnątrz tzw. Pierwszej Pętli (Loop 1, Cordes & Lazio 2002) - nietypowych struktur lokalnego ośrodka międzygwiazdowego.

W pracy zwróciliśmy również uwagę na nietypowe zachowanie strumienia średniego tego pulsara, polegające na jego całkowitych wygaśnięciach, trwających od 2 do kilku godzin. Sugerowaliśmy, że może być to związane z efektami soczewek plazmowych (Clegg i inni, 1998), gęstych ale bardzo nie-

wielkich zgrupowań plazmy, które przemieszczając się nachodzą na linię widzenia pulsara kompletnie uniemożliwiając propagację promieniowania. Jak się później okazało wszystko jednak wskazuje na to, że są to zjawiska związane z mechanizmem promieniowania pulsara i tzw. *nullingiem* (patrz Sobey i inni, 2015), a nie z efektami związanymi z ośrodkiem międzygwiazdowym.

Podsumowując, głównym wynikiem moich badań było pokazanie, że w wypadku pulsara B0823+26, podobnie jak to miało miejsce dla PSR B0329+54 (patrz H1), ewolucja parametrów scyntytacji z częstotliwością obserwacyjną sugeruje, że widmo turbulencji w ośrodku międzygwiazdowym wzdłuż tej linii widzenia daje się lepiej opisać tzw. widmem krytycznym, raczej niż widmem Kołmogorowa. Nie da się jednak wykluczyć możliwości, że za nietypowe zachowanie parametrów scyntytacji odpowiedzialny jest specyficzny charakter lokalnego ośrodka międzygwiazdowego.

[H3] W tej pracy przedstawione zostały wyniki pomiarów parametrów rozpraszania sygnału pulsarów w ośrodku międzygwiazdowym dla 25 obiektów. Badania zostały oparte na danych archiwalnych z własnych obserwacji prowadzonych w ramach różnorodnych projektów obserwacyjnych. Obserwacje te przeprowadzone zostały z użyciem radioteleskopu GMRT w Indiach, oraz 100-metrowego radioteleskopu w Effelsbergu k. Bonn (Niemcy). Tam gdzie było to możliwe wykorzystałem także profile pulsarów zarchiwizowane w bazie danych EPN (European Pulsar Network) oraz w bazie ATNF (Australia Telescope National Facility, dane z teleskopu Parkes).

Profile średnie pulsarów, zarówno te z własnych obserwacji jak i uzyskane ze wspomnianych baz danych zostały przeanalizowane pod kątem pomiaru wielkości efektów związanych z poszerzeniem pulsu wynikającym z rozpraszania fal radiowych w ośrodku międzygwiazdowym. W ogólności obserwowany profil pulsara jest konwolucją jego profilu własnego oraz funkcji „odpowiedzi ośrodka”, której kształt jest zależny od przyjętego modelu zjawiska rozpraszania. Jeżeli założymy że rozpraszanie daje się opisać modelem cienkiego ekranu (patrz rozdział 4c1) to funkcja odpowiedzi ekranu daje się przedstawić jako prosta funkcja eksponencjalnego zaniku (patrz Williamson 1972, 1973). Problemem pozostaje nieznajomość profilu własnego pulsara. Badaniach zaprezentowanych w tej pracy przyjęto iż profil własny daje się w przybliżeniu opisać funkcją Gaussa. Konwolucja funkcji Gaussa i funkcji eksponencjalnego zaniku z bardzo dużą dokładnością daje się opisać tzw. funkcją błędu (ang. error function). Za pomocą tej właśnie funkcji przeprowadziliśmy modelowanie zebranych profili pulsarów, poprzez dopasowanie wspomnianej funkcji do zaobserwowanego profilu pulsarów z użyciem metody najmniejszych kwadratów. W rezultacie udało się wyznaczyć wielkości czasu rozpraszania (τ_d , patrz też rozdział 4c1), czyli wielkości opisującej charakterystyczną skalę czasową tego zjawiska, dla analizowanych profili średnich obserwowanych pulsarów.

W pracy szeroko przedyskutowałem możliwe źródła błędów pomiarowych jakie wynikać mogą z przyjętej metody wyznaczania czasu rozpraszania. Niektóre z efektów które spowodować mogą błędny pomiar tej wielkości występują niezależnie od użytej metody wyznaczania τ_d . Do takich należą przede wszystkim efekty związane z tzw. ewolucją profili pulsarów, czyli zmianami kształtu obserwowanego profilu własnego na różnych częstotliwościach obserwacyjnych. Dodatkowo, użycie uproszczonej metody opisanej w tej pracy narażone jest na błędy wynikające z asymetrii profili własnych. Zwróciłem też uwagę, że niezależnie od użytej metody wyniki pomiarów należy traktować jako niepewne, szczególnie gdy zmierzona wielkość poszerzenia pulsu jest mniejsza lub porównywalna z szerokością własną nie-rozproszonego pulsu.

Dla wszystkich 25 analizowanych pulsarów uzyskaliśmy - na podstawie pomiarów własnych lub danych znalezionych w literaturze - oszacowania wielkości czasu rozpraszania na co najmniej dwóch częstotliwościach radiowych. Pozwoliło to wyznaczyć indeks skalowania częstotliwościowego α dla tych obiektów. Znajomość indeksu skalowania, przynajmniej w teorii pozwala na określenie widma fluktuacji gęstości w ośrodku międzygwiazdowym. Dane uzyskane w wyniku naszej analizy zestawiliśmy z podobnymi danymi z prac Loehmer i inni (2001, 2004), których autorzy przeanalizowali zjawisko rozpraszania (na wielu częstotliwościach obserwacyjnych) dla 27 obiektów, i była to największa próbka tego typu opisana przed opublikowaniem omawianej tu pracy. Przedstawiona analiza skupiała

się głównie na zależności indeksu skalowania zjawiska rozpraszania od miary dyspersji (DM) pulsara. Rozważania teoretyczne (Romani, Narayan & Blandford, 1986) przewidują, że dla większości prostych geometrii zjawiska rozpraszania przewidywany indeks skalowania α powinien mieścić się w zakresie $4.0 < \alpha < 4.4$. Już Loehmer i inni (2001, 2004) zauważyli w swoich pracach, że szczególnie dla pulsarów o dużych miarach dyspersji ($DM > 300 \text{ pc cm}^{-3}$) wartość indeksu α znacząco odbiega od przewidywań teoretycznych, a w szczególności jest znacząco mniejsza (wartość średnia dla takich obiektów wynosi $\alpha = 3.48$). Nasza analiza, która znacząco poszerzyła próbkę pulsarów z wyznaczonymi obserwacyjnie indeksami skalowania potwierdziła niemal dokładnie sugestie Loehmer i inni (2001, 2004), z jedną drobną różnicą - w niniejszej pracy sugeruję, że rozbieżności od teorii występują nawet dla pulsarów o miarach dyspersji nieco mniejszych niż sugerowali to Loehmer i inni (2001, 2004).

W pracy H3 przeanalizowaliśmy również zależność oszacowanych wartości indeksu skalowania α od położenia pulsara na niebie, jak również od jego położenia w naszej Galaktyce. Nie udało się znaleźć żadnych silnych korelacji pomiędzy tymi parametrami, poza słabym związkiem indeksu skalowania rozpraszania od odległości pulsara od Ziemi - związek ten jest jednak prostą pochodną zależności od miary dyspersji.

W pracy H3 szeroko przedyskutowałem możliwe powody rozbieżności obserwowanych indeksów skalowania α od przewidywań teoretycznych. Wyróżnić w tej kwestii można cztery główne idee: (i) różne geometrie zjawiska rozpraszania, np. możliwość wystąpienia rozpraszania na więcej niż jednym „ekranie”; (ii) widmo turbulencji w ośrodku międzygwiazdowym, które nie musi być opisywalne widmem Kolmogorowa; (iii) uproszczenia teorii, szczególnie w kwestii tzw. skali wewnętrznej widma fluktuacji gęstości ośrodka, oraz (iv) założenia teorii rozpraszania przyjmujące, że ośrodek międzygwiazdowy jest izotropowy i jednorodny. W dyskusji zwróciłem uwagę na to, że szczególnie geometria rozpraszania może być istotnym powodem dla którego to dla odległych pulsarów indeks skalowania α odbiega od teorii - duża odległość np. zwiększa szansę wystąpienia wielokrotnych rozproszeń, które zmieniają charakter zależności częstotliwościowej. Używając danych zawartych w pracy spróbowałem także wykryć efekty związane z punktem (iii) - skalą wewnętrzną. Powinny objawiać się one zmianą indeksu skalowania i różnymi jego wartościami w różnych zakresach częstotliwości obserwacyjnych. Przebadaliśmy pod tym względem 4 pulsary o największej liczbie indywidualnych pomiarów czasu rozpraszania ale nie uzyskaliśmy jednoznacznych rezultatów. Zwróciłem także uwagę na możliwy wpływ efektów związanych z niejednorodnościami zjonizowanego ośrodka międzygwiazdowego, które objawiają się zmiennością parametrów rozpraszania i przez to mogą wpływać na kształt uzyskiwanych widm tego zjawiska - w widmach tych oszacowania na różnych częstotliwościach wyznaczone są zazwyczaj w zupełnie różnym czasie, czasami w odstępach rzędu wielu lat, podczas gdy oczekiwana skala czasowa zmienności wynikającej z niejednorodności jest rzędu tygodni lub miesięcy. Jako możliwe rozwiązanie tego problemu zaproponowałem quasi-symultaniczne pomiary czasów rozpraszania, prowadzone na wielu częstotliwościach w odstępach nie większych niż kilka tygodni.

Podsumowując, w pracy przeprowadziłem analizę wieloczęstotliwościowych pomiarów czasu rozpraszania dla kilkunastu pulsarów, dla wielu z nich analiza taka została przeprowadzona po raz pierwszy. Badania tej - znacznie powiększonej względem wcześniejszych studiów - próbki obiektów pokazały, że dla wielu pulsarów obserwowany indeks skalowania częstotliwościowego dla czasu rozpraszania jest niższy, niż przewiduje to większość prostych geometrycznych teorii zjawiska rozpraszania w ośrodku międzygwiazdowym. Praca również dogłębnie dyskutuje możliwe źródła błędów oszacowań czasu rozpraszania, oraz wszystkie możliwe efekty które mogą tłumaczyć rozbieżności obserwowanych parametrów względem przewidywań teoretycznych.

[H4] Kontynuując badania rozpoczęte w pracy H3 postanowiłem zebrać wszystkie dostępne wyniki pomiarów czasów rozpraszania jakie udało nam się znaleźć w literaturze i uzupełnić je o jak największą ilość nowych pomiarów czasów rozpraszania na wielu częstotliwościach radiowych, które oparliśmy na profilach znalezionych w bazach danych EPN i ATNF (patrz też opis pracy H3). W ten sposób zebraliśmy największą liczbę oszacowań parametrów zjawiska rozpraszania jaka kiedykolwiek została

poddana analizie.

Nowe pomiary czasów rozpraszania pulsów wykonane zostały tą samą metodą jak w pracy H3 - poprzez modelowanie kształtu pulsu za pomocą konwolucji funkcji Gaussa (którą przybliżaliśmy profile własne pulsarów) z funkcją odpowiedzi ośrodka w postaci funkcji eksponencjalnego zaniku. Wszystkie wyniki naszych pomiarów czasów rozpraszania, wraz z opublikowanymi wcześniej rezultatami znalezionymi w literaturze zawarte zostały w stosunkowo obszernym dodatku do pracy. Oszacowania czasu rozpraszania posłużyły mi do wyznaczenia indeksu częstotliwościowego rozpraszania dla analizowanej próbki pulsarów.

W przeciwieństwie do pracy H3 przyjąłem zasadę, iż warunkiem koniecznym do wiarygodnego wyznaczenia indeksu skalowania α będzie oparcie jego oszacowania na pomiarach czasu rozproszenia na co najmniej trzech różnych częstotliwościach radiowych - tylko w takim wypadku możliwe jest wiarygodne określenie niepewności wyznaczenia indeksu α .

Analiza danych zaowocowała wyznaczeniem wiarygodnych oszacowań indeksu skalowania dla 33 obiektów. Wyniki analizy połączyliśmy z wyznaczeniami wykonanymi wcześniej w pracy H3, oraz z danymi pochodzącymi z obserwacji scyntytacji międzygwiazdowych pulsarów, dla których indeks skalowania pasma dekorelacji jest taki sam jak indeks skalowania rozpraszania (patrz rozdział 4c1). Podobnie jak to zrobili wcześniej Loehmer i inni (2001, 2004), wykorzystałem dane scyntyacyjne opublikowane w literaturze, głównie przez Cordes i inni (1985) i Johnston i inni (1998), ale także własne pomiary opublikowane w pracach H1 i H2.

Zestawienie wszystkich rezultatów pozwoliło na zebranie oszacowań indeksu skalowania α dla 60 obiektów, czyli próbki ponad dwukrotnie większej niż kiedykolwiek wcześniej miało to miejsce. W największej wcześniej opublikowanej analizie Loehmer i inni (2001, 2004) pokazali wyniki dla 27 obiektów. Dodatkowo wspomnieć trzeba, że dla znacznej ilości (około połowy) spośród tych 27 wcześniej opublikowanych oszacowań α , uzupełnienie wcześniejszych wyników o nasze nowe pomiary (opublikowane w pracy H3 i pracy tu opisywanej) pozwoliło na znaczne ulepszenie wyznaczeń wartości indeksu skalowania.

Posiadając największą próbkę oszacowań indeksu skalowania α powtórzyłem analizę zależności tej wielkości od różnych parametrów pulsarów. Szczególnie interesujące wyniki dała analiza zachowania indeksu α od miary dyspersji pulsara. W przeciwieństwie do wcześniejszych prac (Loehmer i inni, 2001,2004; oraz praca H3) pokazaliśmy że obserwowane wartości α dla niektórych obiektów znacząco odbiegają od teoretycznych przewidywań ($4.0 < \alpha < 4.4$, Romani, Narayan & Blandford, 1986) niezależnie od wartości ich miary dyspersji - czyli zarówno dla pulsarów odległych (co sugerowane już było wcześniej) jak i dla pulsarów bliskich. Zasugerowałem również, że ta niespójność wynika z bardzo niewielkiej statystyki rozważanej w poprzednich tego typu analizach, co dodatkowo wzmocnione było efektami selekcji obserwacyjnej.

Uzyskawszy indeksy skalowania α dla 60 obiektów przeprowadziliśmy także analizę innych parametrów opisujących zjawisko rozpraszania, takich jak znormalizowany czas rozpraszania (czyli czas rozpraszania przeskalowany z użyciem oszacowanego α na standardową częstotliwość 1 GHz), oraz współczynnik siły fluktuacji ośrodka międzygwiazdowego C_{ne}^2 . Wcześniejsze analizy tych parametrów opierały się na pomiarach czasu rozpraszania wykonanych (w większości wypadków) na jednej częstotliwości, co oznaczało, że do przeskalowania pomiaru na częstotliwość standardową autorzy musieli użyć skalowania opartego wyłącznie na przewidywaniach teoretycznych (patrz np. Ramachandran i inni, 1997, Bhat i inni, 2004). Przy obliczaniu tych parametrów dla naszej próbki pulsarów do uzyskania zestandaryzowanej wartości użyłem wyników naszych własnych oszacowań indeksu skalowania dla poszczególnych obiektów, co uniezależniło nas od większości założeń teoretycznych.

Przeanalizowaliśmy zależność zestandaryzowanego czasu rozpraszania τ_d na częstotliwości 1 GHz od miary dyspersji. Nasze wyniki okazały się stosunkowo zgodne z wcześniejszymi badaniami (Bhat i inni, 2004, Ramachandran i inni, 1997, Loehmer i inni, 2001,2004). Jednocześnie zauważyliśmy jednak, że wyznaczenia oparte na pomiarach indeksu skalowania pasma dekorelacji odbiegają nieco od wyników opartych na skalowaniu czasów rozproszenia. Teoria rozpraszania i scyntytacji (patrz np.

Rickett, 1990) przewiduje, że czas rozproszenia jest ściśle związany z wielkością pasma dekorelacji poprzez zależność $2\pi\tau_d\Delta\nu = C_1$ (patrz też rozdział 4c1), przy czym stała C_1 nie powinna znacząco odbiegać od jedności. Nasza analiza zestandaryzowanego czasu rozpraszania wykazała jednak, że bardziej prawdopodobna jest wartość C_1 bliska 5, co potwierdziliśmy także w wypadku dwóch pulsarów dla których posiadaliśmy jednocześnie pomiary pasma dekorelacji scyntylacji i czasu rozpraszania. Zastanawiającym jest fakt, że obecna teoria tych zjawisk zdecydowanie nie pozwala na to by stała C_1 miała tak dużą wartość. Niektóre wcześniejsze oszacowania również wskazywały na to iż faktycznie wartość C_1 bliska jest jedności (Backer, 1974, Cordes i inni, 1990), aczkolwiek Loehmer et al. (2004) również sugerują, że wielkość ta odbiega od teoretycznych przewidywań.

Przeanalizowaliśmy także zależności parametrów rozpraszania dla pulsarów od ich położenia w Galaktyce, ponownie nie znajdując żadnych silnych korelacji. Potwierdziło to po raz kolejny, że parametry zjawisk obserwowanych w pulsarach i wywołanych przez wpływ ośrodka międzygwiazdowego są dużo bardziej zależne od przebiegu linii widzenia poszczególnych obiektów, i występujących wzdłuż nich geometrii rozpraszania, niż bezpośrednio od uśrednionych wskaźników takich jak np. miara dyspersji.

Podsumowując - w pracy wyraźnie pokazałem, że rozbieżności pomiędzy obserwowanymi parametrami opisującymi zjawiska rozpraszania i scyntylacji w ośrodku międzygwiazdowym, a przewidywaniami opartymi na najprostszych teoriach (i/lub geometriach) tych zjawisk występują dla pulsarów niezależnie od ich miary dyspersji (lub odległości). Jest to wynik znacząco różny od wcześniejszych badań tego typu (np. Loehmer i inni, 2001, 2004), jednakże można go uznać za wiarygodny, gdyż został oparty na próbkce obserwacyjnej ponad dwukrotnie większej, niż to miało miejsce we wspomnianych wcześniejszych studiach. Wskazałem także iż obecnie używana teoria, w szczególności w aspekcie powiązania zjawisk rozpraszania i scyntylacji nie jest w stanie wyjaśnić różnic obserwowanych dla niektórych pulsarów. Mogłoby to sugerować, że związek pomiędzy czasem rozpraszania a pasmem dekorelacji scyntylacji może być inny niż przewiduje to obecnie najpowszechniej używana teoria.

[H5] W pracy tej przedstawiliśmy wyniki mojego projektu obserwacyjnego który został przeprowadzony za pomocą radioteleskopu GMRT w Indiach i polegał na wieloczęstotliwościowych obserwacjach profili średnich wybranej próbki 10 pulsarów, w celu wyznaczenia obserwowanych parametrów zjawiska rozpraszania.

Przedstawiony w tej pracy projekt obserwacyjny jest pierwszym z projektów zaplanowanych jako kontynuacja naszych badań opisanych w pracach H3 i H4. Badania tam przedstawione opierały się w części na analizie danych archiwalnych i danych z wcześniejszych (nie związanych bezpośrednio z przedstawionym tu osiągnięciem) projektów obserwacyjnych. Opisany tu projekt był pierwszym zaplanowanym wyłącznie z myślą o wyznaczeniu parametrów zjawiska rozpraszania sygnału pulsarów w ośrodku międzygwiazdowym.

Jako próbkę obserwacyjną wybrałem 10 obiektów, o których z wcześniejszych badań (H3 i H4) wiedzieliśmy, że w zakresie częstotliwości od 150 MHz do 1 GHz wykazują w znaczący sposób zjawisko rozproszeniowego poszerzenia pulsu. jednocześnie były to obiekty dla których informacje te były bardzo wrywkowe i nie pozwoliły wcześniej na wiarygodne wyznaczenie indeksu skalowania rozpraszania α .

Obserwacje wykonane zostały w 2014 roku i w rezultacie analizy udało się zmierzyć 26 czasów rozproszenia dla badanych 10 obiektów. Pozwoliło to na wyznaczenie lub poprawienie oszacowań indeksu skalowania dla ośmiu z tych obiektów i dodanie ich do próbki zaprezentowanej w pracy H4. Przeprowadzona została analiza podobna do wcześniej przedstawionych w H3 i H4 badań zależności indeksów skalowania α i parametrów opisujących całkowitą ilość rozpraszania (zestandaryzowany czas rozpraszania, siła fluktuacji ośrodka) od miary dyspersji, odległości oraz położenia pulsarów w Galaktyce.

W porównaniu z wcześniej opublikowanymi pracami użyłem nieco zmodyfikowanych metod dla wyznaczenia czasu rozpraszania jak i dla określenia niepewności indeksu skalowania α . W modelowaniu obserwowanych profili pulsarów zamiast używania pojedynczej funkcji Gaussa jako przybliżenia profilu własnego pulsara użyliśmy kombinacji linowej kilku takich funkcji, która dopasowana była do profilu na

najwyższej częstotliwości, na której efekty związane z rozpraszaniem sygnału były zanedbywalnie małe. Niepewności oszacowań indeksu skalowania rozpraszania oszacowane zostały dwiema alternatywnymi metodami - za pomocą mapowania płaszczyzny χ^2 , oraz za pomocą symulacji Monte-Carlo, gdy stwierdziliśmy, że żadna z tych metod z osobna nie daje wiarygodnych wyników dla wszystkich pulsarów z próbki (co wynika ze specyfiki wieloczęstotliwościowych pomiarów czasu rozpraszania).

Zwiększenie próbki analizowanych indeksów rozpraszania α do 64 nie zmieniło w znaczący sposób wniosków zawartych już w pracy H4, ale pokazało, że dokładniejsze studia, nawet dla pulsarów które zostały już wcześniej (częściowo) przebadane, jest możliwe i pozwala uzyskać wiarygodne rezultaty, co dobrze rokuje dla kolejnych projektów obserwacyjnych które zamierzam prowadzić w przyszłości. W dyskusji podkreśliśmy, fakt, że dla pojedynczych pulsarów parametry opisujące efekty związane z rozpraszaniem sygnału (i/lub scyntylacjami międzygwiazdowymi) mogą znacząco odbiegać od przewidywań teoretycznych, aczkolwiek po uśrednieniu całej przebadanej populacji wyniki są stosunkowo zgodne z wcześniejszymi postulatami wysuniętymi np. przez Loehmer i inni (2001, 2004). W szczególności rozbieżności od przewidywań teorii są największe dla pulsarów najodleglejszych, o największych miarach dyspersji. W przeciwieństwie do wspomnianej analizy nasze wyniki wskazują, że rozbieżności te stają się statystycznie istotne tylko dla bardzo odległych pulsarów, o miarach dyspersji większych niż około 500 pc cm^{-3} , a nie jak wcześniej spekulowano powyżej 300 pc cm^{-3}

Podsumowując, w pracy zaprezentowałem wyniki pilotowego projektu obserwacyjnego, którego celem było określenie parametrów rozpraszania sygnału pulsarów w ośrodku międzygwiazdowym, w obserwacjach prowadzonych na wielu częstotliwościach. Choć próbka obserwacyjna zawierała tylko 10 obiektów, uzyskane rezultaty w jasny sposób pokazują, że tego typu badania są możliwe i sensowne; i mogą pozwolić w przyszłości na znaczne zwiększenie statystyki pulsarów dla których zjawisko rozpraszania przebadane zostało na więcej niż jednej częstotliwości. To z kolei pozwoli na znaczne rozszerzenia naszej wiedzy na temat turbulentnych własności ośrodka międzygwiazdowego. Dodanie wyników z tej publikacji do wcześniejszych analiz pokazanych w pracy H4 jeszcze silniej potwierdziło, że rozbieżności pomiędzy obserwowanymi właściwościami zjawiska rozpraszania a przewidywaniami teoretycznymi występują dla pulsarów niezależnie od ich miary dyspersji (która jest dobrym wyznacznikiem odległości) - statystycznie istotne odstępstwo od tej reguły pojawia się wyłącznie dla bardzo odległych pulsarów ($DM > 500 \text{ pc cm}^{-3}$, a być może nawet więcej).

[H6] W tej publikacji zająłem się nieco innym aspektem oddziaływania materii zjonizowanej w ośrodku międzygwiazdowym z promieniowaniem radiowym pulsarów, a mianowicie ze zjawiskiem absorpcji termicznej. Praca miała na celu sprawdzenie czy obserwowane u niektórych pulsarów widma typu GPS (gigahertz-peaked spectra) mogą zostać wyjaśnione przy użyciu absorpcji swobodno-swobodnej na elektronach znajdujących się w zjonizowanej materii międzygwiazdowej. a w szczególności w bliskich otoczeniach pulsarów takich jak mgławice będące pozostałościami po wybuchach gwiazd supernowych, czy tzw. mgławice wiatru pulsarowego (ang. pulsar wind nebulae).

Obecnie znamy już kilkanaście pulsarów z widmami pokazującymi przegięcie na częstotliwościach około 1GHz (Kijak i inni, 2011a, 2011b, 2013, ; Allen i inni, 2013; Dembska i inni, 2014, 2015 Pennucci i inni, 2015). Widma te wyróżniają się wśród widm większości pulsarów, gdyż te zazwyczaj dają się opisać pojedynczą funkcją potęgową.

Kijak i inni, (2011b) na podstawie analizy zmienności widma pulsara PSR B1259-63 (znajdującego się w układzie podwójnym z masywną gwiazdą typu Be) zaproponowali, że za obserwowane w tym obiekcie widma typu GPS odpowiedzialna może być absorpcja swobodno-swobodna na elektronach będących jednym ze składników wiatru gwiazdowego masywnej gwiazdy będącej towarzyszem pulsara. Pozostałe znane pulsary z widmami typu GPS nie posiadają jednak gwiazdowych towarzyszy, więc nie było jasne, czy obserwowane w ich widmach przegięcia mogą być wywołane przez absorpcję promieniowania na niskich częstotliwościach radiowych, absorpcję która powoduje odwrócenie przebiegu widma w tym zakresie.

Absorpcja swobodno-swobodna już wcześniej była sugerowana jako wyjaśnienie przegięć w wid-

mach niektórych pulsarów, które obserwuje się na częstotliwościach bardzo niskich, około 200 MHz i poniżej (Sieber, 1973). Jasnym jednak było, że przeciętna gęstość materii występującej w ośrodku międzygwiazdowym, o ile może wyjaśnić przegięcia w widmie na bardzo niskich częstotliwościach to jest zdecydowanie zbyt mała by móc spowodować znaczącą absorpcję na częstotliwościach około 1 GHz.

Kijak i inni (2011a) zauważyli, że znacząca część spośród izolowanych pulsarów z widmami typu GPS posiada nietypowe otoczenia, takie jak mgławice wiatru pulsarowego czy pozostałości po supernowych. W związku z tym podjęliśmy próbę wymodelowania widm pulsarów znajdujących się w takich otoczeniach by sprawdzić czy mogą one powodować pojawienie się wystarczająco silnej absorpcji.

Przeprowadzone i zaprezentowane w niniejszej publikacji badania pokazały, że w pewnych specyficznych warunkach zarówno w pozostałościach po supernowych, jak i w pulsarach znajdujących się wewnątrz mgławic wiatru pulsarowego warunki fizyczne w nich występujące mogą wywołać absorpcję promieniowania na częstotliwościach rzędu 1GHz i poniżej, która spowoduje zmianę obserwowanego widma pulsara ze standardowego widma potęgowego na widmo typu GPS. W wypadku pozostałości po supernowych koniecznym jest, by linia widzenia pulsara przebiegała przez szczególnie gęste „filamenty” w nich się znajdujące - ich gęstość sięga czasami kilku tysięcy elektronów na centymetr sześcienny (patrz np. Koo i inni, 2007) co jest liczbą ogromną w porównaniu do przeciętnej gęstości swobodnych elektronów w ośrodku międzygwiazdowym (zazwyczaj poniżej 0.1 cząstki na cm^3). Podobnie mgławice wiatru pulsarowego, przy uwzględnieniu ich geometrii mogą być źródłem wystarczająco silnej absorpcji.

Najważniejszym osiągnięciem zaprezentowanym w tej publikacji jest aplikacja zaprezentowanego modelu do widma radio-magnetara SGR J1745–2900, obiektu który znajduje się niemal w samym środku Drogi Mlecznej, zaledwie 0.1 parseka od centralnej czarnej dziury. Shannon & Johnston (2013) zmierzili bardzo dokładnie widmo tego magnetara w tydzień po rozbłysku rentgenowskim podczas którego obiekt ten został odkryty, oraz w miesiąc później. Widma te były znacząco różne. Używając opublikowanych we wspomnianej pracy danych obserwacyjnych udało się nam wyjaśnić nietypowy kształt tego widma oraz jego zmienność. W naszym modelu widmo magnetara zaburzone zostało poprzez absorpcje swobodno-swobodną w zjonizowanej materii wyrzuconej podczas rozbłysku rentgenowskiego. Absorpcja ta z czasem spadała w miarę rozrzedzania się tej materii, aczkolwiek fakt, że widmo tego magnetara nie przyjęło formy prostej funkcji potęgowej sugeruje istnienie dodatkowego absorbera znajdującego się gdzieś na linii widzenia magnetara, co sprawia że widmo tego obiektu jest widmem typu GPS (zostało to niezależnie potwierdzone przez Pennucci i inni, 2015 na podstawie niezależnych obserwacji widma SGR J1745–2900).

Użycie zaprezentowanego tutaj, opartego na założeniu absorpcji swobodno-swobodnej, modelu widma tego radio magnetara pozwoliło określić parametry fizyczne absorbującej materii, zarówno jej składnika wyrzuconego podczas rozbłysku (temperatura około 5000 K, gęstość rzędu 2×10^5 cząstek na cm^3), jak również zewnętrznego absorbera ($T = 200 \text{ K}$, $N_e = 500$ cząstek na cm^3). Wyniki naszego modelowania mogą się więc przysłużyć nie tylko rozwiązaniu problemu występowania widm typu GPS u pulsarów radiowych, ale mogą się w znaczny sposób przyczynić do rozwiązania problemu promieniowania radiowego magnetarów, jak również pomóc w rozwiązaniu zagadki braku odkryć innych pulsarów w samym centrum Drogi Mlecznej - badania tego zagadnienia, inspirowane zaprezentowanym tu modelem, zostały już podjęte przez społeczność naukową (Rajwade i inni, 2016).

4c4. Uwagi końcowe:

Pragnę nadmienić, że wszystkie prace ujęte w ramach prezentowanego tutaj osiągnięcia naukowego opublikowane zostały stosunkowo niedawno, tj. w ciągu ostatnich 5 lat, co nie pozwoliło jeszcze na akumulację znaczącej liczby cytowań. Dotyczy to zresztą całości mojego dorobku po doktoracie: aż 14 z 15 prac recenzowanych opublikowanych zostało po 2010 roku (co wyjaśnione zostało w szczegółach punkcie 5b).

Prace dotyczące analizy rozpraszania radiowego pulsarów przedstawione powyżej (szczególnie H3 i H4) już zostały zauważone przez społeczność naukową i są już cytowane, a w najbliższym czasie staną

się podstawowymi źródłami informacji o właściwościach tego zjawiska w kontekście całości populacji pulsarów. Prace H3 (opublikowana w 2013 roku) oraz szczególnie H4 (opublikowana w maju 2015) mają już zauważalną liczbę cytowań. Podobnie praca H6 związana z modelowaniem absorpcji swobodno-swobodnej została już zauważona.

Literatura użyta w tekście referatu:

- Allen B., Knispel B., Cordes J. M. et al. 2013, ApJ, 773, 91
Backer, D. C. 1974, ApJ, 190, 667
Bhat N. D. R., Gupta Y., Rao A. P., 1998, ApJS, 500, 262
Bhat, N.D.R., Cordes, J.M., Camilo, F., Nice, D.J. & Lorimer, D.R. 2004, ApJ, 605, 759
Bilous, A., Kondratiev, V., Kramer M, et al. 2015, arXiv:1511.01767
Clegg A. W., Fey A. L., Lazio T. J. W., 1998, ApJ, 496, 253
Cordes, J.M., Weisberg, J.M. & Boriakoff, V. 1985, ApJ, 288, 221
Cordes, J.M. 1986, ApJ, 311, 183
Cordes, J.M., Wolszczan, A., Dewey, R. J., Blaskiewicz, M. & Stinebring, D. R. 1990, ApJ, 349, 245
Cordes, J. M. & Lazio, T. J. W. 2002, arXiv:astro-ph/0207156
Dembska, M., Kijak, J., Jessner, A., Lewandowski, W., Bhattacharyya B. & Gupta, Y. 2014, MNRAS, 445, 3105
Dembska M., Basu R., Kijak J., Lewandowski W., 2015b, MNRAS, 449, 1869
Gupta, Y. 2000, in Pulsar Astronomy - 2000 and Beyond, ASP Conference Series, Vol. 202 (M. Kramer, N. Wex, and R. Wielebinski eds.), p. 539
Jessner, A. 1996, in: Large Antennas in Radio Astronomy. Noordwijk, the Netherlands, p. 185
Johnston S., Nicastro L., Koribalski B., 1998, MNRAS, 297, 108
Kijak, J. & Gil, J. 2003, A&A, 397,969
Kijak J., Gupta Y., Krzeszowski K., 2007, A&A, 462, 699
Kijak, J., Lewandowski, W., Maron, O., Gupta, Y. & Jessner, A. 2011a, A&A, 531, A16
Kijak, J., Dembska, M., Lewandowski, W., Melikidze, G., Sendyk, M., 2011b, MNRAS, 418, L114
Kijak, J., Tarczewski, L., Lewandowski, W., Melikidze, G., 2013, ApJ, 772, 29
Koo, B.-C., Moon, D.-S., Lee, H.-G., Lee, J.-J. and Matthews, K., 2007, ApJ, 657, 308-317
Konacki M., Lewandowski W., Wolszczan A., Doroshenko O., Kramer M., 1999, ApJ, 519, L81
Loehmer, O., Kramer, M., Mitra, D., Lorimer, D.R. & Lyne, A.G. 2001, ApJ, 562, L157
Loehmer, O., Mitra, D., Gupta, Y., Kramer, M. & Ahuja, A. 2004, A&A, 425, 569
Manchester, R.N. & Taylor, J.H. 1972, Astrophysical Letters, Vol. 10, p.67
Maron, O., Kijak, J., Kramer, M. and Wielebinski, R., 2000, AApS, 147, 195
Pennucci, T. T., Possenti, A., Esposito, P., et al. 2015, ApJ, 808, article id: 81
Rajwade K., Lorimer D. R., Anderson L. D., 2016, MNRAS, 455, 493
Ramachandran, R., Mitra, D., Deshpande, A. A., McConnell, D. M. & Ables, J. G. 1997, MNRAS, 290, 260
Rickett, B.J. 1990, ARA&A, 28, 561
Rohlfs, K. & Wilson, T. L., 2004, *Tools of radio astronomy*, Berlin: Springer
Romani, R.W., Narayan, R. & Blandford, R. 1986, 220, 19
Roy, J., Gupta, Y., Ue-Li Pen et al, 2010, Experimental Astronomy, 28, 25
Scheuer, P.A.G. 1968, Nature, 218, 920
Sieber, W., 1973, AAp, 28, 237
Simonetti J. H., Cordes J. M., Heeschen D. S., 1985, ApJ, 296, 46
Shannon, R. M., & Johnston, S. 2013, MNRAS, 435, L29
Sobey, C., et al. 2015, MNRAS 451, 2493
Stovall, K., Ray, P. S., Blythe, J. et al., 2015, ApJ, 808, article id. 156
Williamson, I.P. 1972, MNRAS, 157,55
Williamson, I.P. 1973, MNRAS, 163,345

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:

Moje zainteresowanie astronomią rozpoczęło się już w szkole średniej (w latach 1987-1992) kiedy to uczęszczałem na organizowane w obserwatorium w Piwnicach pod Toruniem koło miłośników astronomii, oraz brałem udział w Ogólnopolskiej Olimpiadzie Astronomicznej zostając trzykrotnie jej laureatem. Studia Astronomii na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu rozpocząłem w 1992 roku i zakończyłem z wyróżnieniem w roku 1997. Począwszy od 3-go roku studiów rozpocząłem współpracę z prof. A. Wolszczanem, który później został promotorem mojej pracy magisterskiej, a następnie doktoratu.

W roku 1996 przy 32-metrowym radioteleskopie Centrum Astronomii UMK w Piwnicach pod Toruniem zainstalowana została „maszyna pulsarowa” PSPM2, szybki wielokanałowy spektrometr przeznaczony do obserwacji pulsarów. W latach 1996-2006 stałem się nieformalnym opiekunem wszystkich obserwacji pulsarów prowadzonych za pomocą tych urządzeń. Do moich obowiązków należało planowanie wszystkich rodzajów obserwacji pulsarów prowadzonych 32-metrowym radioteleskopem, analiza danych i opieka nad sprzętem i oprogramowaniem.

Osobiście zajmowałem się głównie aspektami obserwacji chronometrażowych pulsarów, które stały się tematem mojej pracy magisterskiej oraz doktoratu. Dzięki prof. Wolszczanowi po uzyskaniu tytułu magistra w 1997 roku, miałem też okazję trzykrotnie odbyć staż na Penn State University (USA, w sumie około 15 miesięcy). Podczas pobytu w Stanach Zjednoczonych wielokrotnie odwiedzałem 305 metrowy radioteleskop w Arecibo (Puerto Rico), gdzie wykonywałem obserwacje pulsarów w ramach projektów obserwacyjnych zarządzanych przez mojego promotora. Najbardziej wymiernym wynikiem tych staży było opublikowanie wyników obserwacji zrealizowanych w Arecibo w pracach Lewandowski i inni (2004, ApJ, v. 600, 905), oraz Bogdanov i inni (2002, ApJ, v. 581, 495).

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

Po uzyskaniu tytułu doktora w 2004 roku zostałem zatrudniony jako asystent, a później adiunkt w Centrum Astronomii UMK w Toruniu (w latach 2004-2006). W tym czasie w dalszym ciągu zajmowałem się opieką nad obserwacjami pulsarów prowadzonymi 32-metrowym radioteleskopem. W roku 2005 kolejna część wyników mojego doktoratu została opublikowana w pracy Loehmer i inni (ApJ, 621, 388).

W roku 2006 przenieśliśmy się do Zielonej Góry gdzie rozpocząłem pracę w Instytucie Astronomii Uniwersytetu Zielonogórskiego. Początkowy okres mojej pracy w tym nowym ośrodku upłynął na aklimatyzacji do nowego środowiska, oraz głównie na wypełnianiu nowych, czasochłonnych obowiązków dydaktycznych (np. przygotowywanie nowych zajęć). Poświęciłem się także poznawaniu projektów badawczych i celów naukowych realizowanych w Instytucie, oraz rozszerzeniu swoich kwalifikacji badawczych na zagadnienia związane z badaniami ośrodka międzygwiazdowego przy pomocy pulsarów - czyli tymi, które później stały się kluczowym elementem przedstawianego tu osiągnięcia naukowego.

W tym czasie, poza pracami dotyczącymi zjawisk scyntytacji i rozpraszania sygnału pulsarów radiowych, zajmowałem się głównie analizą i interpretacją danych obserwacyjnych dotyczących pulsarów z widmami typu GPS (gigahertz-peaked spectra). W ramach współpracy z dr hab J. Kijakiem i jego doktorantką M. Dembską (byłem promotorem pomocniczym doktoratu) powstała cała seria prac dotyczących tego zagadnienia - Kijak i inni (2011, A&A, 531, A16; 2011b, MNRAS 418, L114; 2013, ApJ 772, id:29) Dembska i inni (2014, MNRAS 445, 3105; 2015 449, 1869). Zwieńczeniem mojej współpracy w tym temacie jest zawarta w dorobku habilitacyjnym praca H6.

Wielokrotnie prowadziłem obserwacje z użyciem interferometru GMRT w Pune (Indie), gdzie współpracowałem również z prof. Y. Gupta przy prowadzeniu i analizie obserwacji chronometrażowych młodego, „gliczującego” pulsara PSR J1833–1054 - współpraca ta zakończyła się publikacją

wyników w pracy Roy i inni (2012, MNRAS 424, 2213).

W roku 2012 byłem jednym z organizatorów konferencji „Electromagnetic Radiation from Pulsars and Magnetars”, która odbyła się w Zielonej Górze między 24 a 27 kwietnia. Byłem członkiem Lokalnego Komitetu Organizacyjnego, i głównym edytorem materiałów pokonferencyjnych (proceedings), które ukazały się nakładem wydawnictwa Astronomical Society of the Pacific, jako jeden z zeszytów serii ASP Conference Series, numer woluminu 466.

Od 2008 roku zajmowałem się także pracą w ramach Konsorcjum POLFAR (polskiego konsorcjum międzynarodowego radioteleskopu LOFAR). Dzięki działalności konsorcjum trzy stacje LOFAR zostały już zbudowane. W konsorcjum zajmowałem się przygotowaniem projektu obserwacji pulsarów pojedynczymi teleskopami LOFAR, oraz kwestiami technicznymi osprzętu do obserwacji pulsarów z ich użyciem (jeden z systemów analizy danych znajduje się także na Uniwersytecie Zielonogórskim).

5c. Plany na przyszłość

W najbliższej przyszłości zamierzam kontynuować swoje badania w zakresie obserwacji zjawisk rozpraszania i scyntytacji międzygwiazdowych za pomocą teleskopu GMRT, jak również innych instrumentów. Jednym z nich będą na pewno polskie stacje międzynarodowego radioteleskopu LOFAR, których budowa została właśnie ukończona. Stacje te w najbliższym czasie wyposażone zostaną w systemy do obserwacji pulsarów radiowych. Ponieważ teleskopy systemu LOFAR pracują w zakresie częstotliwości od 10 do 240 MHz, czyli w zakresie niskich częstotliwości na których promieniowanie radiowe pulsarów (nawet tych bliskich) ulega silnemu rozproszeniu, wyniki tych planowanych obserwacji stanowić będą idealne rozszerzenie dotychczasowych badań i mam nadzieję że pomogą rozwiązać zagadkę anormalnego rozpraszania sygnału radiowego pulsarów dla niektórych bliskich obiektów.

Innym rozszerzeniem moich badań będzie prowadzenie obserwacji scyntytacji i rozpraszania również z użyciem innych teleskopów, takich jak radioteleskop w Effelsbergu czy radioteleskop GBT. Mam nadzieję że dalsze badania rozpraszania i scyntytacji w ośrodku międzygwiazdowym pozwolą wyjaśnić zagadkowe rozbieżności pomiędzy parametrami tych zjawisk, w szczególności zależności czasu rozpraszania i pasma dekorrelacji scyntytacji, które - co udało się pokazać w pracy H4 - mogą być inne niż przewiduje teoria (chodzi tu w szczególności o tzw. problem stałej rozpraszania C_1).

W dalszej perspektywie, zebranie kolejnych danych dotyczących rozpraszania i scyntytacji promieniowania radiowego pulsarów powinno pozwolić na opracowanie nowego modelu rozkładu swobodnych elektronów w Galaktyce. Model najczęściej obecnie używany, NE2001 (Cordes & Lazio, 2002, arXiv:astro-ph/0207156) ma już prawie 15 lat i nie uwzględnia wielu nowych wyników obserwacyjnych, i skądinąd wiadomo że w niektórych wypadkach jego przewidywania są dalekie od wyników obserwacyjnych. W celu opracowania nowego modelu wstępnie rozpoczęliśmy współpracę z jednym z autorów modelu NE2001, prof. Jimem Cordesem - obserwacje do pierwszego wspólnego projektu obserwacyjnego (teleskop GMRT, kod projektu 27_038) zostały już przeprowadzone w 2015 roku.

6. Dane biometryczne dorobku publikacyjnego:

Sumaryczny impact factor według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania:

Dla prac opublikowanych w 2015 roku wartość Impact Factor dla czasopism została przyjęta na poziomie jednakowym z danymi z roku 2014.

IF = 92.713 (77.705 za lata 2005-2015)

6b Liczba cytowań publikacji:

Ponieważ baza danych Web of Science (WoS) stanowi niekompletne źródło informacji o cytowaniach publikacji z dziedziny astronomii i astrofizyki, oprócz liczby cytowań według bazy WoS i wynikającego z niej indeksu Hirscha, podaję również dane według bazy SAO/NASA Astrophysics Data System (ADS). Dane na dzień: 30.11.2015 r.

Łączna liczba publikacji: 41 (recenzowanych 20)

Liczba publikacji po doktoracie: 33 (recenzowanych 17)

Liczba cytowań wg bazy WoS: 183 (cytowania bez autocytowań 136)

Liczba cytowań wg bazy ADS: 215

6c Indeks Hirscha:

Indeks Hirscha wg bazy WoS: 8

Indeks Hirscha wg bazy ADS: 9

Wojciech Lavandowski