

Imię i nazwisko: Gopal Bhatta

Wykształcenie:

- GRUDZIEŃ 2012 | Doktorat z fizyki, Florida International University, USA
Tytuł rozprawy: *The Nature of Microvariability in the Blazar S5 0716+714*
Promotor: Prof. James R. WEBB
- LIPIEC 2000 | Magisterium z fizyki, Tribhuvan University, Kathmandu, Nepal
Tytuł pracy: *Null and time-like geodesics in Kerr-de Sitter spacetime*
Opiekun: Prof. Udayraj KHANAL

Obejmowane stanowiska:

- SIERPIEŃ 2013 | Postdoc, Zakład Astrofizyki Wysokich Energii
- OBECNIE | Obserwatorium Astronomiczne Uniwersytetu Jagiellońskiego
- STYCZEŃ 2013 | Adiunkt
- SIERPIEŃ 2013 | Wydział Fizyki, Florida International University, USA
- STYCZEŃ-GRUDZIEŃ 2012 | Dissertation Year Fellow
Wydział Fizyki, Florida International University, USA
- STYCZEŃ 2007 | Dyplomowany wykładowca
- GRUDZIEŃ 2011 | Wydział Fizyki, Florida International University, USA
- STYCZEŃ 2003 | Wykładowca fizyki
- GRUDZIEŃ 2006 | Capital College and Research Center, Kathmandu, Nepal

Praca o znaczącej wartości naukowej, wg: 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.):

Tytuł dorobku naukowego:

Badania zmienności blazarów na wielu częstotliwościach: podróż w najgłębsze rejony blazarów

Główne recenzowane publikacje:

- H1. **Bhatta, G.**, 2018, *Galaxies*, 6, 136
Detection of periodic radio signal from the blazar J1043+ 2408
- H2. **Bhatta, G.**, Mohorian, M., & Bilinsky, I. 2018, *A&A*, 619, A93
Hard X-ray properties of NuSTAR blazars
- H3. **Bhatta, G.**, Stawarz, L., Markowitz, A., et al. 2018, *ApJ*, 866, 132
Signatures of the disk-jet coupling in the Broad-line Radio Quasar 4C+74.26
- H4. **Bhatta, G.**, & Webb, J. 2018, *Galaxies*, 6, 2
Microvariability in BL Lac: "Zooming" into the Innermost Blazar Regions
- H5. **Bhatta, G.** 2017, *ApJ*, 487, 7B
Radio and γ -Ray Variability in the BL Lac PKS 0219-164: Detection of Quasi-periodic Oscillations in the Radio Light Curve

- H6. **Bhatta, G., Zola S., Stawarz, L., et al.** 2016, *ApJ*, 832, 47
Detection of Possible Quasi-periodic Oscillations in the Long-term Optical Light Curve of the BL Lac Object OJ 287
- H7. **Bhatta, G., Stawarz, L., Ostrowski, M., et al.** 2016, *ApJ*, 831, 92B
Multifrequency Photo-polarimetric WEBT Observation Campaign on the Blazar S5 0716+714: Source Microvariability and Search for Characteristic Timescales

Osiągnięcia w nauce - przegląd motywacji naukowych oraz wyników:

Aktywne jądra galaktyk (z ang. AGN) są najjaśniejszymi źródłami we Wszechświecie. Powszechnie uważa się, że ich źródłem zasilana jest akrecja materii na supermasywną czarną dziurę. Podklasa radiowo głośnych AGN-ów z relatywistycznymi dżetami skierowanymi wzdłuż linii widzenia jest znana jako blazary. Blazary są identyfikowane poprzez ich ekstremalne właściwości, takie jak wysoka jasność, szybka zmienność wartości strumienia i polaryzacji oraz duża emisja na wysokich energiach – w zakresie rentgenowskim czy gamma. Aczkolwiek, pomimo iż dzięki zaawansowanym teleskopom oraz detektorom mamy sporą wiedzę na temat tych źródeł, szczegóły procesów zachodzących w pobliżu regionu centralnego, jak np. natura procesów akrecyjnych, połączenie na linii dysk-dżet, a także rola pola magnetycznego w tworzeniu dżetów, nadal są stosunkowo słabo poznane.

W przypadku blazarów modulacje wartości strumienia w wyniku procesów mających miejsce w dysku łatwo mogą zostać przyćmione poprzez dopplerowsko wzmocnioną emisję z dżetów. Jednak cień owych modulacji powinien, w zasadzie, rozprzestrzeniać się wzdłuż strumienia tak, że ślady ich charakterystycznych skal czasowych powinny zostać ujawnione przez odpowiednie analizy szeregów czasowych – jako przerwy lub piki w gęstości widmowej mocy (PSD) długoterminowych krzywych zmian blasku blazarów. Takie skale czasowe można następnie powiązać z różnymi procesami w dżecie i dysku akrecyjnym, takimi jak procesy dynamiczne, termiczne i lepkie (Czerny, 2004). Przykładowo dla blazarów o typowej masie pomiędzy $\sim 10^8 - 10^9 M_{\odot}$ dynamiczne, termiczne i lepkie skale czasowe są rzędu od kilku godzin do kilku lat.

Podobnie niektóre modele AGN przewidują quasi-periodyczne oscylacje (QPO) w strumieniu z charakterystycznymi skalami czasowymi również w zakresie od kilku godzin do kilku lat. Rzeczywiście, ostatnio pojawiły się liczne doniesienia o wykryciu QPO w różnych typach AGN-ów, włączając w to te radiowo głośne jak i radiowo ciche (zob. Bhatta, 2017 i Bhatta i in., 2016b). Ponadto QPO są również widoczne w ostatnich badaniach numerycznych, obejmujących symulacje relatywistycznych dżetów (McKinney i in. 2012). Na przykład w scenariuszu wysoko namagnetyzowanego dysku akrecyjnego, odgrywającego kluczową rolę w tworzeniu się dżetów w AGN-ie, powszechnie znanym jako *magnetic flux paradigm*, różne niestabilności magnetohydrodynamiczne na styku dysku i magnetosfery mogą spowodować pojawienie się QPO. Owe quasi-periodyczne oscylacje mogą wówczas rozprzestrzeniać się wzdłuż dżetu, modulując jego emisję, i być zarejestrowane w wielozakresowych obserwacjach. W podobnym kontekście rozbłysk (flara) w paśmie optycznym o wysokim stopniu polaryzacji, odkryty przez Bhatta i in. (2015), może być sygnaturą dominacji pola magnetycznego w pobliżu jądra blazara, tzw. *magnetically arrested disk (MAD) scenario* (zob. Narayan i in. 2003).

Spośród 12 recenzowanych artykułów, które ukazały się po uzyskaniu przeze mnie stopnia doktora (od końca 2012 r.), załączam i omawiam tutaj pokrótce 7 wybranych prac. Prace te moim zdaniem są przykładem mojej głównej działalności badawczej na przestrzeni lat, konsekwentnie przyczyniając się do badań nad zmiennością blazarów na wielu zakresach częstotliwości. Wybrane publikacje ilustrują różnorodność metodologii badań i podejścia przyjętego przeze mnie oraz moich współpracowników podczas przeprowadzania analiz. Metody te często obejmują oryginalne projekty/zamysły jak i prowadzenie kampanii obserwacyjnych, pozyskiwanie danych, przetwarzanie danych obserwacyjnych, obliczenia analityczne oraz modelowanie numeryczne.

Ogólne wprowadzenie do tematu:

Przypuszcza się, iż blazary (i ogólnie galaktyki aktywne – AGN-y) skrywają niewyobrażalnie gigantyczne czarne dziury, miliardy razy masywniejsze od Słońca, ściśnięte w objętości tak małej, jak Układ Słoneczny. Otaczający czarną dziurę dysk akrecyjny nieustannie zasila ją ogromną ilością materii, która to sprawia, że jądra galaktyk są niezwykle jasne i w konsekwencji przyćmiewają całą galaktykę. Centralny silnik wyrzuca materię niemal z prędkością światła, tworząc relatywistyczne dżety. Te skolimowane strugi plazmy emitują promieniowanie nietermiczne w szerokim spektrum fali elektromagnetycznej – od fal radiowych po najbardziej energetyczne fale promieniowania gamma. Szerokopasmowy rozkład spektralny energii (SED) blazarów często można scharakteryzować poprzez charakterystyczny podwójny rozkład w płaszczyźnie strumienia i częstotliwości. Pierwsze

maksimum, zwykle znajdujące się między zakresem radiowym a rentgenowskim, powstaje w wyniku emisji synchrotronowej przez energetyczne cząstki przyspieszane w polu magnetycznym; podczas gdy pochodzenie komponentu na wyższej częstotliwości, rozciągającego się od promieniowania rentgenowskiego do energii rzędu TeV, jest nadal przedmiotem dyskusji. Wg modeli leptonicznych, np. Maraschi et al. (1992); Bloom & Marscher (1996), powstaje w wyniku odwrotnego rozpraszania Comptona fotonów o niższych energiach przez energetyczne cząstki. W zjawisku komptonizacji promieniowania synchrotronowego (*synchrotron self-Compton scenario*, SSC) ta sama populacja wysokoenergetycznych elektronów odpowiedzialnych za emisję synchrotronową rozprasza powstające fotony do wyższych energii. Jednakże w *external Compton scenario* (EC) fotony ośrodka mogą pochodzić z różnych części galaktyki aktywnej, np. dysku akrecyjnego (AD; Dermer & Schlickeiser 1993), obszaru szerokich linii (BLR; Sikora 1994) bądź też pyłowego torusa (DT; Błażejowski et al. 2000). Z kolei modele hadronowe przypisują wysoką energię emisji z blazarów interakcji relatywistycznych protonów w obecności silnych pól magnetycznych (np., Mannheim & Biermann, 1992; Aharonian, 2000; Mücke et al., 2003).

Blazary można dalej podzielić na dwie podklasy: radiowe kwazary o płaskim spektrum (FSRQ) oraz lacertydy, zapisywane jako BL Lacertae (BL Lac). Te jaśniejsze źródła, FSRQ, ukazują linie emisyjne w widmie, a maksimum emisji synchrotronowej znajduje się na niższej częstotliwości. Ponieważ źródła mają obfite ilości fotonów tła ze względu na obecność dysku akrecyjnego, obszaru szerokich linii oraz pyłowego torusa, wysoka energia emisji jest najprawdopodobniej spowodowana przez proces EC, jako przeciwieństwo do SSC (Ghisellini et al., 2011). Obiekty BL Lac stanowią mniej "wydajną" podklasę, która ma albo słabe albo brak linii emisyjnych nad kontinuum, a pik promieniowania synchrotronowego tych obiektów leży między ultrafioletem a zakresem rentgenowskim. BL Lacs reprezentują ekstremalną klasę źródeł z nadwyżką emisji w wysokich energiach (od twardego promieniowania rentgenowskiego do emisji w zakresie TeV), wynikającą z procesów emisji synchrotronowej oraz odwrotnego rozpraszania Comptona (IC). Jednak ich pozorna niska jasność może być spowodowana brakiem silnych obszarów fotonowych wokół jądra (*circumnuclear photon fields*) i stosunkowo niskimi tempami akrecji. Blazary możemy dalej podzielić ze względu na częstotliwości występowania maksimum promieniowania synchrotronowego (ν_s): z pikiem na wysokich energiach – *high synchrotron peaked* (HSP; $\nu_s > 10^{15}$ Hz), pośrednie – *intermediate synchrotron peaked* (ISP; $10^{14} < \nu_s < 10^{15}$ Hz) oraz z pikiem w zakresie niskich energii – *low synchrotron peaked* (LSP; $\nu_s < 10^{14}$ Hz) (zob. Abdo et al., 2010). W schemacie unifikacyjnym, znanym jako *blazar sequence*, jasność bolometryczna maleje, gdy przechodzimy od FSRQ do HSP, ale zwiększa się emisja promieniowania gamma (Fossati et al., 1998; Ghisellini et al., 2017). Oznacza to, że podczas gdy FSRQ są zdominowane przez promieniowanie w zakresie gamma, w źródłach HSP emisje synchrotronowa oraz gamma stają się porównywalne. Innymi słowy, wraz ze wzrostem jasności bolometrycznych blazary stają się bardziej czerwone, a dominancja komptonowska, będąca stosunkiem jasności maksimum związanego ze zjawiskiem Comptona do wartości maksimum związanym z promieniowaniem synchrotronowym, wzrasta. Ostatnio, blazar TXS 0506+056 został powiązany z pierwszą pozagwiazdową emisją neutrin, wykrytą przez eksperyment IceCube (Padovani et al., 2018).

Przypuszcza się, iż dżety są zasilane poprzez proces Blandforda-Znajka (zob. Blandford & Znajek, 1977), tj. poprzez pozyskiwanie energii obrotowej czarnych dziur za pomocą pola magnetycznego dysku akrecyjnego, które jest skrócone spiralnie w pobliżu szybko rotujących czarnych dziur, a tym samym torującego drogę strumieniom relatywistycznych cząstek, które przebijają się przez ośrodek międzygalaktyczny na odległości do rzędu kilku megaparseków. W związku z tym wszelkie zmiany tempa akrecji lub innej wewnętrznej konfiguracji tempa akrecji i pola magnetycznego, mogą prowadzić do zmian strumienia na wielu zakresach częstotliwościach. Kontinuum promieniowania blazara charakteryzuje się zmienną emisją szerokopasmową, zarówno strumienia jak i polaryzacji, w różnych skalach czasowych. Skale czasowe zmienności można ogólnie sprowadzić do zmienności długookresowej (*long-term variability*), krótkookresowej (*short-term variability*) oraz tzw. mikrozmienności (*intraday/night variability* lub *microvariability*). Długookresowa zmienność, zazwyczaj rozciągająca się na kilka lat, może wynikać ze zmieniających się wartości tempa akrecji; zmienność krótkookresowa, którą zwykle utożsamia się z migotliwymi epizodami trwającymi kilka tygodni do kilku miesięcy, może być skutkiem przechodzenia fal uderzeniowych rozprzestrzeniających się wzdłuż blazarowych dżetów; natomiast mikrozmienność może wynikać z turbulencji w najbardziej wewnętrznej obszarze dżetów (np., Bhatta et al., 2013; Marscher & Travis, 1996). Zasadniczo zmienność wykazywana przez galaktyki aktywne wydaje się mieć przeważnie charakter aperiodyczny, chociaż wykryto quasi-periodyczne oscylacje na różnych skalach czasowych dla wielu źródeł (zob. Bhatta, 2017; Bhatta et al., 2016c; Zola et al., 2016). Generalnie sygnatury (quasi-) periodycznych oscylacji mogą być ujawnione jako duże piki w periodogramach źródłowych krzywych zmian blasku. QPO mogą również powstać w pobliżu granicy dysku z magnetosferą – procesy te bezpośrednio są związane z aktywnością w pobliżu czarnej dziury. (Quasi-) Oscylacje mogą powstać przy różnych scenariuszach, włączając podwójne

supermasywne czarne dziury, precesję dysku oraz dżetu, precesję/efekt Lense-Thirringa wokół wirujących czarnych dziur, stąd opatrzone są sygnaturą czasoprzestrzeni w pobliżu szybko rotujących czarnych dziur.

Metodologia badań:

Zasadniczo zmienność źródła, widoczna na krzywej zmian jasności, można zmierzyć na dwa sposoby: Amplituda zmienności (VA), oszacowana przy użyciu dwóch ekstremalnych wartości strumienia krzywej zmian blasku, mierzy tzw. oscylację *peak-to-peak* i jest wyrażona (jak w Heidt & Wagner (1996)) jako

$$VA = \sqrt{(A_{max} - A_{min})^2 - 2\sigma^2}, \quad (1)$$

gdzie A_{max} , A_{min} oraz σ są odpowiednio maksimum, minimum i średnią błędów jasności krzywej zmian blasku. Z kolei w celu oszacowania średniej zmienności w okresie obserwacji bardziej odpowiednia jest ułamkowa zmienność (z ang. *fractional variability*, FV). Dla średniej wartości strumienia $\langle F \rangle$ z wariancją S^2 i średnim błędem kwadratowym $\langle \sigma_{err}^2 \rangle$, ułamkowa wariancja (jak w (Vaughan et al., 2003)) jest dana jako

$$F_{var} = \sqrt{\frac{S^2 - \langle \sigma_{err}^2 \rangle}{\langle F \rangle^2}}. \quad (2)$$

Niepewność F_{var} można wyrazić jako

$$\sigma_{F_{var}} = \sqrt{F_{var}^2 + \sqrt{\frac{2 \langle \sigma_{err}^2 \rangle^2}{N \langle F \rangle^4} + \frac{4 \langle \sigma_{err}^2 \rangle}{N \langle F \rangle^2} F_{var}^2 - F_{var}^2}}. \quad (3)$$

Metodologia badawcza opiera się głównie na idei, iż wielozakresowe właściwości blazara można wykorzystać do wnioskowania o fizycznych procesach zachodzących w najbardziej wewnętrznych rejonach tych źródeł, czy ogólnie w AGN-ach. W tym celu obserwacje blazarów z różnych teleskopów działających w szerokim zakresie elektromagnetycznego spektrum - w szczególności Owens Valley Radio Observatory (OVRO), teleskopów optycznych, Swift, NuSTAR i Fermi/LAT - rozciągającym się do dekad, a następnie kilka metod z analizy szeregów czasowych przeprowadza się w celu ograniczenia ich właściwości statystycznych.

W szczególności, widmo energii w dziedzinie czasu i częstotliwości analizuje się w celu wyszukania cech charakterystycznych, np. załamania w spektrum energetycznym, które to prawdopodobnie może wskazywać na istnienie charakterystycznych skal czasowych w krzywych zmian jasności. Badanie przeprowadzono we współpracy z moimi kolegami z Boston Blazar Group ¹, z Whole Earth Blazar Telescope (WEBT ²) oraz grupą prowadzącą długookresowe monitorowanie AGN-ów z Obserwatorium Astronomicznego Uniwersytetu Jagiellońskiego ³. Metody analizy szeregów czasowych zastosowane w tych badaniach są krótko omówione poniżej.

Analizy szeregów czasowych:

- i. Dyskretny periodogram Fouriera: Dla serii czasowych $f(t_j)$ z czasem próbkowania t_j ($j = 1, 2, \dots, n$), dyskretna moc Fouriera dla danej częstotliwości kątovej ω jest wyrażona jako:

$$P(\omega) = \frac{1}{N} \left| \sum_{j=1}^n f(t_j) e^{-i\omega t_j} \right|^2. \quad (4)$$

Dla pełnego okresu obserwacji L współczynnik normalizacji $N = 2L / (n\bar{f})^2$ jest wybrany w ten sposób, by jednostką periodogramu było $(rms/mean)^2/d$. Dyskretna transformata Fouriera jest przeprowadzana przy zastosowaniu $n/2$ częstotliwości z minimalną wartością częstotliwości $\omega_{min} = 2\pi/L$ i $\omega_k = \omega_{min}k$, gdzie $k=1, 2, \dots, n/2$.

¹<https://www.bu.edu/blazars/research.html>

²<http://www.to.astro.it/blazars/webt/>

³<http://www.oa.uj.edu.pl/>

- ii. Periodogram Lomb-Scargle'a: Periodogram Lomb-Scargle'a (Lomb, 1976; Scargle, 1982) jest jedną z najszerzej stosowanych metod, która przybliża analizy okresowości z wielu stron, np. *analizy Fouriera*, *metody najmniejszych kwadratów*, *bayesowskiej teorii prawdopodobieństwa* i techniki *bin-based phase-folding*, stąd też ma przewagę nad tradycyjnym periodogramem Fouriera (zob. VanderPlas, 2018). Aby rozwiązać problem z nierównomiernie oddzielonymi zestawami danych, metoda Lomb-Scargle'a modyfikuje powyższy periodogram tak, że dopasowanie metodą najmniejszych kwadratów fal sinusoidalnych w postaci $X_f(t) = A \cos \omega t + B \sin \omega t$ jest zminimalizowane (Lomb, 1976; Scargle, 1982). Zmodyfikowany periodogram jest wyrażony jako

$$P = \frac{1}{2} \left\{ \frac{[\sum_i x_i \cos \omega (t_i - \tau)]^2}{\sum_i \cos^2 \omega (t_i - \tau)} + \frac{[\sum_i x_i \sin \omega (t_i - \tau)]^2}{\sum_i \sin^2 \omega (t_i - \tau)} \right\}, \quad (5)$$

gdzie τ jest dane przez $\tan(2\omega\tau) = \sum_i \sin \omega t_i / \sum_i \cos \omega t_i$.

- iii. Ważona falkowa transformata Z: W przypadku zastosowań w analizie okresowości powyższe dwie metody wymagają, by okresowy sygnał utrzymywał się dla całego zakresu danych. Jednak w wielu systemach astrofizycznych okresowości są raczej chwilowe, tj. mamy quasi-okresowe oscylacje. W takich przypadkach analiza falkowa staje się bardziej preferowanym narzędziem. W tej metodzie fale sinusoidalne, zlokalizowane w domenach czasu i częstotliwości, mogą być skalowane pod względem częstotliwości i przesuwane w czasie w celu dopasowania do danych. W metodzie ważonej falkowej transformaty Z (WWZ; Foster 1996), najbardziej nadającej się do nierównomiernie rozłożonych obserwacji, funkcje mogą być postrzegane jako ważne projekcje/rzuty na następujące funkcje próbne

$$\phi_1(t) = \mathbf{1}(t), \quad \phi_2 = \cos[\omega(t - \tau)], \quad \text{and} \quad \phi_3 = \sin[\omega(t - \tau)] \quad (6)$$

Waga podana jako $w_i = e^{-c \omega^2 (t_i - \tau)^2}$, gdzie c pełni rolę parametru dostrajania. Przy V_x i V_y jako, odpowiednio, ważonych wariancjach danych i funkcji modelu, moc WWZ może być zapisana jako

$$WWZ = \frac{(N_{eff} - 3) V_y}{2 (V_x - V_y)}, \quad (7)$$

gdzie N_{eff} jest rzeczywistą liczbą punktów.

- iv. Dyskretna funkcja krzyżowania/autokorelacji: Dyskretna funkcja korelacji (DCF), opisana w Edelson & Krolik (1988), jest najszerzej stosowana do badania korelacji krzyżowej między dwoma szeregami czasowymi z nierównomiernym odstępem (zob. Bhatta & Webb, 2018). "Niezbiniowana" DCF może być oszacowana jako

$$UDCF_{ij} = \frac{(x_i - \bar{x})(y_j - \bar{y})}{\sqrt{(\sigma_x^2 - e_x^2)(\sigma_y^2 - e_y^2)}} \quad (8)$$

gdzie $\bar{x}$ i $\bar{y}$, σ^2 , e^2 odpowiadają odpowiednio średniej, wariancji oraz niepewności jasności dwóch krzywych zmian blasku. Te dyskretne pary mogą być zbinowane przedziałem o szerokości porównywalnej do szerokości próbkowania krzywych zmian blasku. Następnie średnia DCF, zawierająca M par w danej szerokości binu (przedziału), jest zapisana jako

$$DCF(\tau) = \frac{1}{M} UDCF_{ij} \quad (9)$$

Jednakże próbkowane rozkłady DCF są wysoce wypaczone, co sprawia, że oszacowanie niepewności DCF na podstawie wariancji próbki jest niezetelne. Jednakże, transformata Z DCF (ZDCF), tj.

$$z = \frac{1}{2} \log \left(\frac{1+r}{1-r} \right), \quad r = \tanh z, \quad (10)$$

gdzie $r = DCF$ śledzi ściśle rozkład normalny ze znaną średnią oraz odchyleniem standardowym. Wraz z tą transformacją estymacja niepewności ZDCF staje się bardziej solidna (zob. Alexander (2013)).

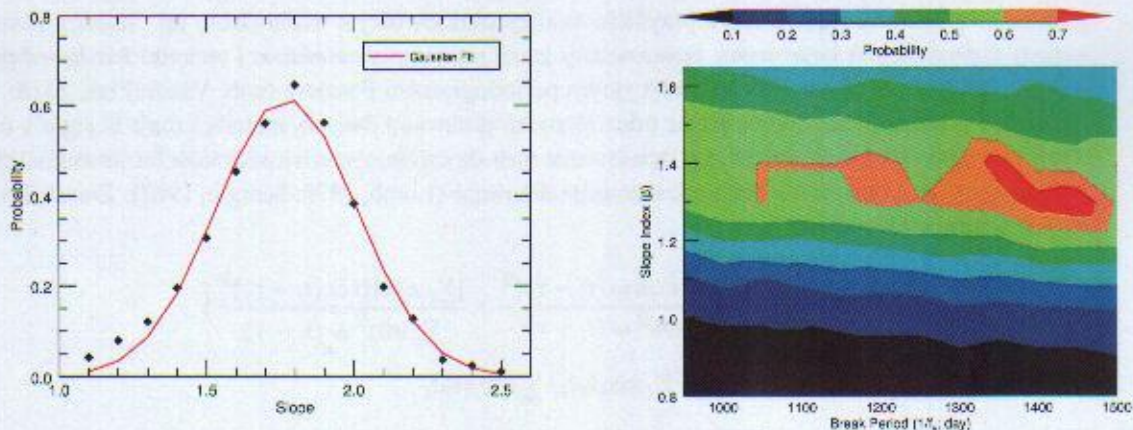


Figure 1: Przykłady narzędzi statystycznych wykorzystujących symulacje MC. Na wykresach przedstawiono metodę oszacowania prawdopodobieństwa, iż model PSD o danych parametrach reprezentuje periodogram analizowanej krzywej zmian jasności. Lewy panel: Czarne symbole reprezentują prawdopodobieństwo jako funkcję indeksu nachylenia dla modelu *power-law* w postaci $P(f) = Cf^{-\alpha}$, gdzie C jest stałą (Bhatta et al., 2016b). Prawy panel: Kontury prawdopodobieństwa w płaszczyźnie $f_b - \alpha$ (break frequency – indeks nachylenia) dla modelu *power-law* w postaci $P(f) = C(f/f_b)^{-\alpha}$ (Bhatta et al., 2016c).

- v. Funkcja struktury (*Structure function*): Funkcja struktury pierwszego rzędu (SF; Simonetti et al. 1985) jest również szeroko stosowana w astronomicznej analizie szeregów czasowych. Dla sygnału $x(t)$ i przesunięcia sygnału τ , funkcja struktury pierwszego rzędu jest dana przez

$$SF(\tau) = \langle [x(t) - x(t + \tau)]^2 \rangle \quad (11)$$

Ogólne interpretacje cech SF omówiono w Hughes et al. (1992). SF można traktować jako odpowiednik PSD krzywej zmian blasku, obliczonej w dziedzinie czasu zamiast dziedzinie częstotliwości. Jedną z głównych zalet SF w porównaniu z PSD jest to, że metoda SF jest mniej wrażliwa na nieregularne próbkowanie w szeregach czasowych i dlatego jest stosunkowo wolna od artefaktów typu okna czy aliasing w dziedzinie częstotliwości (e.g. Lainela & Valtaoja, 1993; Paltani et al., 1997). To sprawia, że SF jest jednym z preferowanych narzędzi w analizie szeregów czasowych, szeroko stosowanych w poszukiwaniu periodyczności w krzywych zmian blasku AGN-ów.

- vi Składanie epok (*Epoch folding*): Po raz pierwszy opracowany przez Leahy et al. (1983), składanie epok jest często omawianą metodą analizy szeregów czasowych. Metoda ta, oparta na domenie czasowej, została później ulepszona przez wielu autorów (np. Davies, 1990, 1991). W przeciwieństwie do tradycyjnego dyskretnego periodogramu Fouriera, który oczekuje, iż periodyczne składowe mają kształt sinusoidalny, metoda ta jest mniej wrażliwa na zmodulowany kształt komponentów. Ponadto, ta metoda jest w dużej mierze niezależna od nieregularności w próbkowaniu obserwacji, a zatem dobrze nadaje się do wyszukiwania okresowości w danych z lukami. W tej metodzie szereg czasowy z N punktami i zmieniający się wokół średniej wartości $\bar{x}$ jest składany na kilku okresach próbnym i przedziałach fazowych. Następnie wielkość χ^2 wyrażona jako

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^M \frac{(x_i - \bar{x})^2}{\sigma_i^2}, \quad (12)$$

jest szacowania, gdzie x_i i σ_i wyrażają odpowiednio średnią oraz odchylenie standardowe każdego z M przedziałów fazowych. W przypadku obserwacji występujących jako gaussowski szum, zwykle znajdujemy $\chi^2 \sim M$. Jednak w przypadku obserwacji zawierających sygnały periodyczne, χ^2 przyjmuje wartość znacznie różniącą się (lub maksymalną) od wartości średniej (zob. Larsson, 1996).

Estymacja istotności: Metoda PSRESP (Power spectrum response)

W astronomicznej analizie szeregów czasowych wiele artefaktów, w tym zachowanie zbliżonego do czernego szumu, nieciągłość danych, skończona długość obserwacji oraz nierównomierne próbkowanie danych,

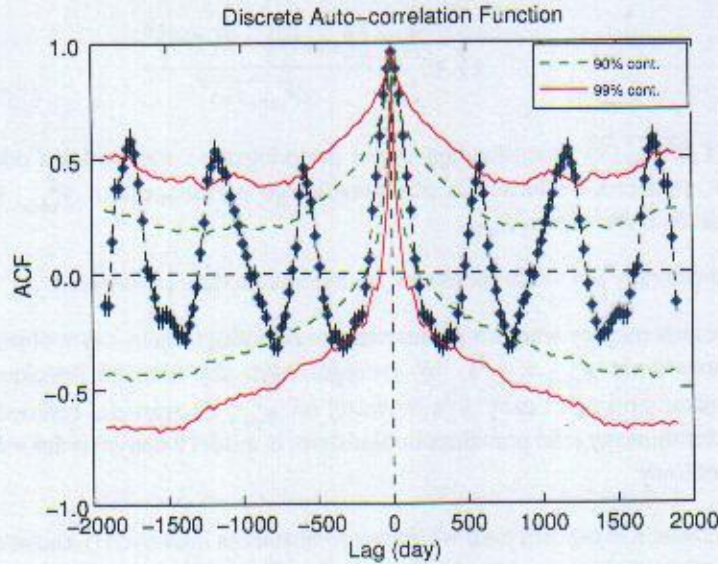


Figure 2: z-transformowana dyskretna funkcja autokorelacji ~ 10.5 -letnich obserwacji na 15 GHz blazara J1043+2408. Powtarzające się wartości szczytowe sugerują ukryty ~ 560 -dniowy periodyczny radiowy sygnał. Przerywane zielone i czerwone krzywe przedstawiają odpowiednio 90% i 99% poziom istotności (from Bhatta, 2018).

mogą potencjalnie zakłócać analizę i wytwarzać fałszywe cechy, które można pomylić z rzeczywistymi sygnałami. Dlatego, aby oszacować znaczenie tych cech spektralnych, takie efekty powinny być szczegółowo przeanalizowane, zwłaszcza przy poszukiwaniu quasi-periodycznych oscylacji. Ponadto istnieje pułapka, że zmienność blazara jest, ogólnie rzecz ujmując, kolorowym typem szumu, z większymi fluktuacjami amplitudy przy dłuższych skalach czasu zmienności. Z wysokimi wartościami amplitud w niższych częstotliwościach region periodogramu może czasem przybrać cechy QPO (Press i in., 1978). Aby rozwiązać te problemy, zastosowaliśmy metodę PSRESP (zob. Uttley i in. (2002)), obejmującą intensywne symulacje Monte Carlo (MC). Metoda ta ma na celu oszacowanie kształtu funkcji gęstości widmowej mocy (PSD), który najlepiej reprezentuje periodogram nierównomiernie rozłożonej krzywej zmian blasku. Metoda prawidłowo uwzględnia wiele artefaktów, zazwyczaj nieuniknionych w analizie w dziedzinie częstotliwości, takich jak *red-noise leak*, zniekształcenie sygnału (aliasing) a także zniekształcenie PSD z powodu nierównomiernego próbkowania. Ponadto dostarcza nam ona miary dobroci dopasowania, a tym samym szacuje niepewności parametrów modelu. Metoda jest w pełni opisana w Uttley et al. 2002 (zob. również Bhatta et al. 2016b oraz załącznik w Chatterjee et al. 2008); tutaj, dla kompletności, krótko podsumowujemy tę metodę jako:

- i) Dla danych serii czasowych $f(t_j)$ z czasem próbkowania t_j ($j = 1, 2, \dots, N$) podczas okresu obserwacji T , periodogram na danej częstotliwości ν jest szacowany przy zastosowaniu wyrażenia

$$P(\nu) = \left| \sum_{j=1}^N f(t_j) e^{-i2\pi\nu t_j} \right|^2. \quad (13)$$

Często, by wyrazić moc zmienności w kategoriach zmienności ułamkowej, stosuje się normalizację postaci $N^2 \mu^2 / 2T$, gdzie μ oznacza średni strumień podczas całego okresu obserwacyjnego. Periodogram jest obliczany na regularnej siatce częstotliwości, począwszy od minimalnej częstotliwości $\nu_{min} = 1/T$ do częstotliwości maksymalnej (Nyquist) $\nu_{max} = N/2T$.

- ii) Aby oszacować indeks nachylenia funkcji potęgowej (power-law), która najlepiej opisuje dany periodogram, symuluje się ogromną ilość krzywych zmian blasku na podstawie modelu *power-law* w postaci $P(f) = \nu^{-\beta} + C$, gdzie β i C oznaczają indeks nachylenia oraz szum Poissona. Te symulowane krzywe zmian jasności są następnie powtórnie próbkowane zgodnie ze źródłową krzywą zmian blasku nim periodogramu dla każdej z nich jest obliczany.

iii) Dla każdej z symulowanych krzywych zmian blasku wielkość χ^2 jest wyznaczana i dana jako

$$\chi_i^2 = \sum_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} \frac{[\overline{P_{\text{sim}}(\nu)} - P_i(\nu)]^2}{\Delta \overline{P_{\text{sim}}(\nu)}^2}, \quad (14)$$

gdzie $\overline{P_{\text{sim}}(\nu)}$ i $\Delta \overline{P_{\text{sim}}(\nu)}$ przedstawiają średni periodogram i standardowe odchylenie symulowanych periodogramów; podobna wielkość dla obserwowanego periodogramu, χ_{obs}^2 , jest również szacowana przez zastąpienie P_i wyrażeniem P_{obs} .

iv) Krok iii) jest powtarzany dla wielu indeksów nachylenia modelu *power-law*.

v) Dobroć dopasowania między średnim symulowanym periodogramem a tym obserwowanym jest szacowana poprzez porównanie χ_{obs}^2 z χ_i^2 s. W szczególności, aby określić ilościowo dobroć dopasowania dla danego indeksu, stosunek liczby χ_i^2 s większej od χ_{obs}^2 do wartości całkowitej χ_i^2 s dla wszystkich symulacji jest zdefiniowany jako prawdopodobieństwo, iż model z danym indeksem najlepiej reprezentuje periodogram źródłowy.

Powyższa metoda szacowania istotności pików widmowych dostarcza *lokalnych* oszacowań, ponieważ jest ważna tylko dla konkretnego okresu. Ponieważ z góry nie posiadamy wiedzy o tym, gdzie może wystąpić znaczący pik, bardziej zdecydowaną miarą istotności może być *istotność globalna*, która jest powiązana z częścią symulowanych mocy w dowolnym okresie poniżej mocy obserwowanej w interesującym nas okresie (zob. Bhatta (2017) oraz Bell i in. (2011)).

Przegląd poszczególnych publikacji:

H1. Wykrycie periodycznego sygnału radiowego z blazara J1043+2408

W tej najnowszej pracy odkryłem powtarzający się sygnał radiowy w blazarze J1043+2408. Przeprowadziłem wiele metod analizy szeregów czasowych, w tym tzw. *epoch folding*, periodogram Lomb-Scargle'a oraz dyskretną funkcję autokorelacji dla obserwacji radiowych z OVRO, obejmujących okres ~ 10.5 roku. Aby rzetelnie uwzględnić procesy generujące czerwony szum, dominujący zwykle w zmienności blazarów, i inne możliwe artefakty, przeprowadzono dużą ilość symulacji Monte Carlo. Wszystkie trzy metody konsekwentnie ujawniały powtarzający się sygnał o częstotliwości ~ 560 dni. Przy użyciu metody PSRESP oszacowałem wysoki poziom istotności (lokalny 99.9 % i globalny 99.4%) w stosunku do możliwości zaistnienia fałszywej detekcji. Po omówieniu wielu możliwych scenariuszy, wywnioskowałem, iż obserwowane periodyczne oscylacje mogą najprawdopodobniej powstawać w supermasywnym układzie dwóch czarnych dziur o współczynniku masy drugiej czarnej dziury do pierwszej 0.01 – 0.1 oraz przy separacji składników rzędu kilku parseków. Taki bliski podwójny supermasywny układ czarnych dziur w ciągu kilku wieków uległby grawitacyjnemu kolapsowi, któremu towarzyszyłaby emisja fal grawitacyjnych o częstotliwości $\sim 10^{-2} \mu\text{Hz}$.

H2. Własności twardego promieniowania rentgenowskiego blazarów dla danych z teleskopu NuSTAR:

Ta praca powstała w wyniku współpracy z zagranicznymi studentami, którzy odwiedzili nas w ramach *Summer Internship Program for Astronomy and Physics*. Spędziłem sześć tygodni nadzorując i ucząc ich analizy rentgenowskiej blazarów. W tej pracy, jednej z najbardziej obszernych prac wykorzystujących obserwacje z teleskopu NuSTAR, badaliśmy właściwości twardego promieniowania rentgenowskiego blazarów jako próbę zrozumienia centralnego źródła badanych obiektów i związanego z nim procesu produkcji dżetu. W szczególności, równoczesne analizy spektralne i czasowe twardych promieni rentgenowskich dla danych ekstremalnie krótkookresowych (mikrozmienność) dają nam możliwość zajrzeć w głąb najbardziej wewnętrznego/zwartego obszaru blazara. Głównym celem pracy było powiązanie zaobserwowanych właściwości twardego promieniowania rentgenowskiego z blazarów z ich strumieniem i stanami spektralnymi, a tym samym, w oparciu o korelację między tymi stanami, wyodrębnić szczegóły dotyczące regionów emisji i procesów zachodzących w pobliżu centralnego silnika. Przeprowadziliśmy analizy czasową, spektralną i wzajemnej korelacji 13-stu blazarów dla 31 obserwacji z NuSTAR. Zbadaliśmy kształty widm w danych zakresie dla poszczególnych źródeł, stosując modele *power-law*, *broken power-law* i *log-parabola*, oraz wykorzystaliśmy test F (Fishera) w celu oszacowania najlepszego dopasowania do kształtu widma. Przeanalizowaliśmy także związek między miękką (3-10 keV) a twardą (10-79 keV) emisją przy użyciu transformaty Z dyskretniej funkcji korelacji. Ponadto podjęliśmy próbę

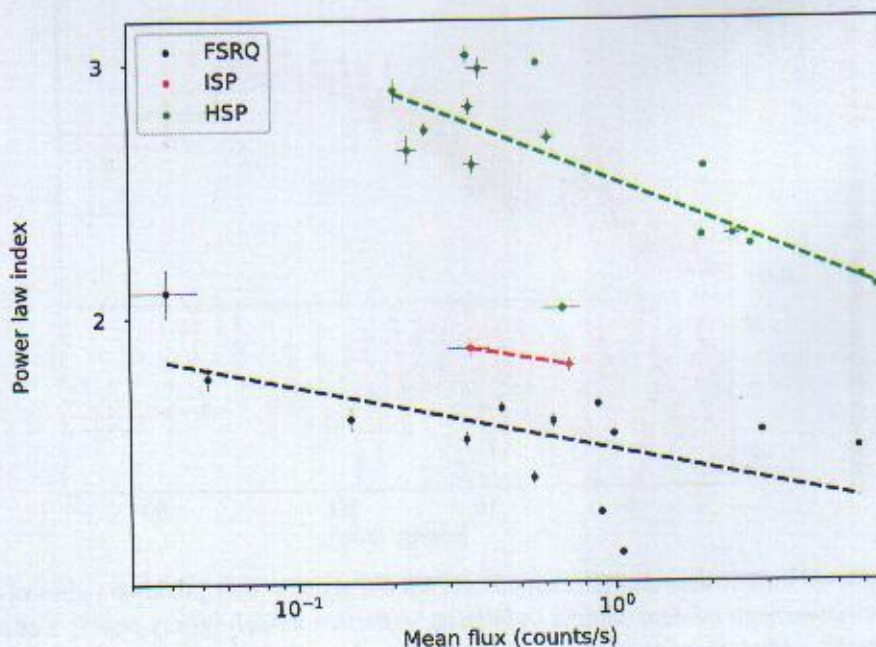


Figure 3: Rozkład indeksów fotonowych funkcji wykładniczej w zakresie średnich strumieni z *NuSTAR* dla kwazarów radiowych o płaskim spektrum (czarny), blazarów z maksimum emisji synchrotronowej na średniej częstotliwości (czerwony) i blazarów z maksimum emisji synchrotronowej na wysokiej częstotliwości (zielony). Przerywane proste przedstawiają odpowiednie najlepsze pasowania liniowe. Rozkład ten ujawnia istnienie podklas blazarów (from Bhatta et al., 2018c).

ograniczenia najmniejszych regionów emisji przy użyciu minimalnych skali zmienności, wyznaczonych z krzywych zmian blasku. Natrafiliśmy na wiele interesujących wyników:

- Odkryliśmy, że dla większości źródeł emisję twardego promieniowania rentgenowskiego można dobrze przedstawić za pomocą modelu *log-parabola* i że nachylenia widm dla różnych podklas blazarów są zgodne z tak zwanym *blazar sequence*.
- Opublikowaliśmy także najbardziej strome widmo z indeksem fotonowym *photon index* ~ 3 dla BL Lacertae PKS 2155-304 oraz najtwardsze widmo z *photon index* ~ 1.4 dla kwazara radiowego (FSRQ) PKS 2149-306.
- Ponadto, zauważyliśmy bliski związek pomiędzy strumieniem a współczynnikiem nachylenia widma w danej podklasie źródeł, w tym sensie, że wysokie wartości strumienia i/lub stany aktywności posiadają twardsze widma.

Co więcej, w obiektach BL Lacertae, zakładając przyspieszanie cząstek przez szoki dyfuzyjne i chłodzenie synchrotronowe jako dominujące procesy rządzące zmiennością obserwowanego strumienia, ograniczamy pole magnetyczne obszaru emisji do kilku Gaussów; podczas gdy w radiowych kwazarach o płaskim spektrum (FSRQ), wykorzystując modele *external Compton*, oszacowaliśmy dolną energię "wstrzykiwanych" elektronów na będące rzędu kilku wartości czynników Lorentza.

H3. Oznaki oddziaływania zachodzącego pomiędzy dyskiem akrecyjnym a dżetem w radiowym kwazarze 4C+74.26:

4C+74.26 to kwazar posiadający niespotykane gigantyczne płyty radiowe, sięgające do ~ 3 milionów lat świetlnych od centralnej czarnej dziury. Obiekt jest dość unikalny, gdyż jego promieniowanie na falach radiowych jest zdominowane przez strumień z dżetu, na częstotliwościach optycznych przez dysk akrecyjny, a w zakresie twardego promieniowania rentgenowskiego przez koronę dysku. Badamy połączenie dysku z dżetem, przeprowadzając analizę korelacji krzyżowej długoterminowych, wielozakresowych (MWL)

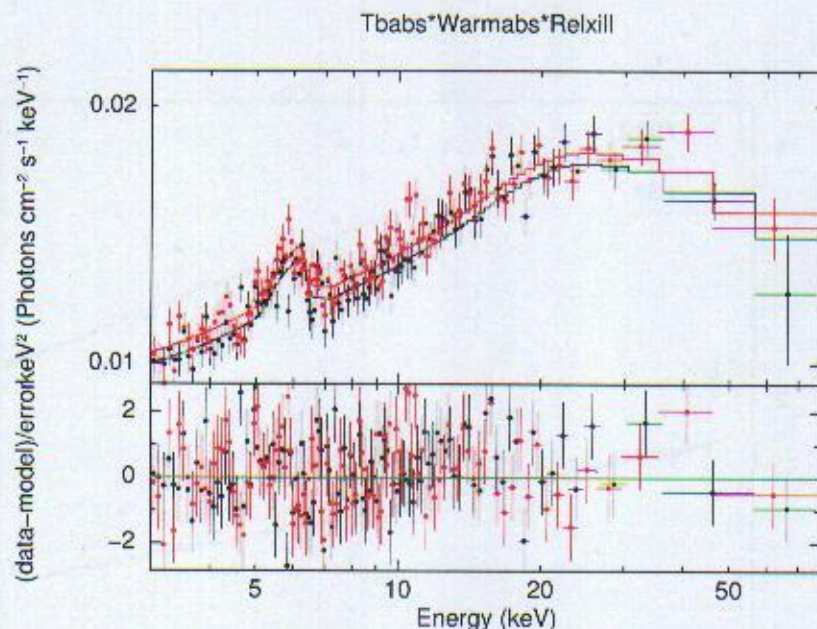


Figure 4: Modelowanie spektralne danych z teleskopu NuSTAR dla gigantycznej galaktyki radiowej 4C+74.26, przy założeniu relatywistycznego modelu odbicia (*relativistic reflection model*) (górny panel), z odpowiednimi residuami (dolny panel). Modelowanie zakłada emisję promieniowania rentgenowskiego pochodzącego z najbardziej wewnętrznej części dysku akrecyjnego, gdzie dominują efekty silnej grawitacji i szybkiej rotacji supermasywnej czarnej dziury. Czerwone i czarne symbole/krzywe odpowiadają odpowiednio modułom FPMA i FPMB teleskopu NuSTAR (z Bhatta et al., 2018b).

krzywych zmian blasku i odkryliśmy, że emisja optyczna została opóźniona względem emisji fal radiowych o ~ 250 dni. Ponieważ uważa się, iż relatywistyczne strumienie plazmy (dżety) w aktywnych jądrach galaktyk (AGN) powstają na skutek obecności pól magnetycznych utrzymywanych przez dyski i wchodzących w ergosferę wirujących czarnych dziur, zmiany strumienia mogą być naturalnie identyfikowane z perturbacjami magnetycznymi w najgłębszych obszarach dysku akrecyjnego. Dlatego też, aby bardziej przyjrzeć się centralnej części AGN-u, przeprowadziliśmy analizę spektralną źródła, wykorzystując obserwacje twardego promieniowania rentgenowskiego z kosmicznego teleskopu NuSTAR. Widma analizowano w oparciu o emisję z korony, odbijaną przez szybko obracające się wewnętrzne obszary dysku akrecyjnego, które zwiększają energię fotonów do wyższych zakresów, w szczególności do twardego promieniowania rentgenowskiego. Modelowanie uwzględniało niektóre z egzotycznych zjawisk, w tym zakrzywianie promieni świetlnych (*bending of the light*) i efekt Lense-Thirringa (*space-time drag*) powstające w pobliżu szybko obracających się supermasywnych czarnych dziur. Ten scenariusz jest podparty ponowną analizą danych z NuSTAR-a, modelowanych w ujęciu relatywistycznego odbicia od dysku oświetlonego przez emisję koronową, która zwraca nam promień wewnętrznego dysku $R_{in}/R_{ISCO} = 35^{+40}_{-16}$. Omówiliśmy globalną energetykę w systemie, argumentując, że podczas gdy proces akrecji przebiega w tempie Eddingtona, z zależną od akrecji jasnością bolometryczną $L_{bol} \sim 9 \times 10^{46} \text{ erg s}^{-1} \sim 0.2 L_{Edd}$, całkowita energia kinetyczna dżetu $L_j \sim 4 \times 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$, wyznaczona z dynamicznego modelowania gigantycznych płatów radiowych obiektu, stanowi jedynie niewielką część dostępnej mocy akrecyjnej.

H4. Mikrozmienność w obiektach BL Lacertae: "Zbliżenie" do najbardziej ukrytych rejonów blazara:

W niniejszej pracy zaprezentowaliśmy wyniki naszego wielozakresowego badania mikrozmienności słynnego blazara BL Lac (BL Lacertae). Wykonaliśmy obserwacje mikrozmienności źródła w pasmach optycznych VRI podczas czterech nocy w 2016 roku. Dokładnie i w szczegółach zbadaliśmy strumień oraz zmienność spektralną źródła w celu scharakteryzowania mikrozmienności obiektu, która jest często obserwowanym zjawiskiem w blazarach. Zastosowaliśmy metody szeregów czasowych, takie jak funkcja struktury (*structure function*) i funkcja autokorelacji transformaty Z, aby scharakteryzować statystyczne właściwości zmiennego blazara. Ponadto zbadaliśmy wielopasmową korelację krzyżową dla źródła. Wyniki pokazały, że źródło często wykazywało gwałtowną zmienność strumienia z amplitudą do 0.2 mag w ciągu kilku godzin, a zmienność barwy w podobnych skalach czasowych można scharakteryzować

GA

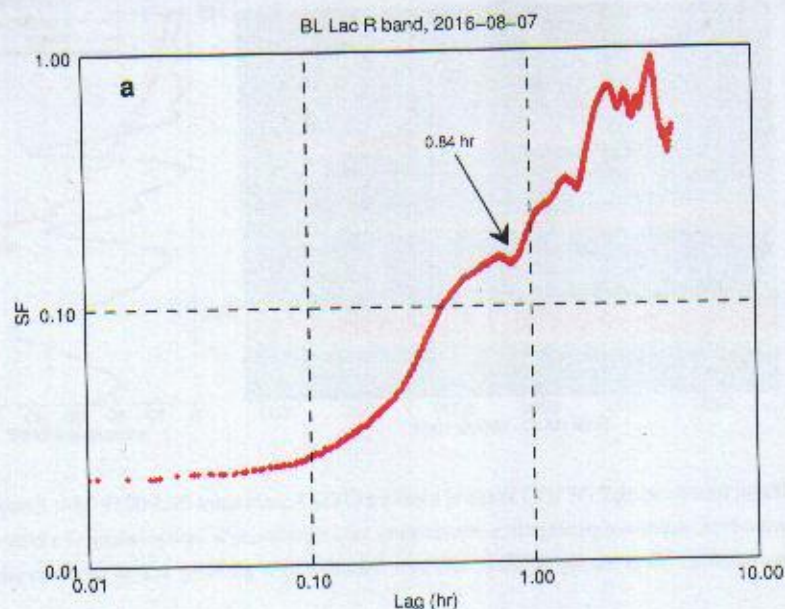


Figure 5: Funkcja struktury obserwacji mikrozmienności blazara BL Lac, ukazująca możliwą charakterystyczną skalę czasową rzędu ~ 1 hr (Bhatta & Webb (2018)).

poprzez trend "*bluer-when-brighter*". Dostrzegliśmy również wyraźnie zakrzywione widmo optyczne dla jednej z nocy. Ponadto korelacja między emisją wielopasmową wykazała, że generalnie emisja we wszystkich zakresach jest silnie skorelowana; dla jednej z nocy stwierdzono, że emisja w paśmie V po czasie 20 minut prowadzi do emisji w paśmie I. Poszukiwanie charakterystycznej skali czasu za pomocą funkcji autokorelacji i analiz funkcji struktury ujawnia charakterystyczną skalę czasową, wynoszącą ~ 84 minut dla jednej z obserwacji w paśmie R. Próbuje wyjaśnić obserwowane wyniki w kontekście przejścia fal uderzeniowych przez relatywistyczne wypływy plazmy w blazarach.

H5. Zmienność obiektu BL Lac PKS 0219-164 w zakresie radiowym oraz gamma: Detekcja quasi-periodycznych oscylacji w radiowej krzywej zmian blasku:

W pracy tej zbadałem właściwości długookresowej zmienności blazara PKS 0219-164 przy użyciu obserwacji radiowych oraz gamma z lat 2008-2017. Obserwacje radiowe uzyskano z teleskopu OVRO w paśmie 15 GHz, podczas gdy obserwacje w zakresie gamma zostały zebrane z teleskopu Fermi/LAT. Analizy doprowadziły do trzech głównych wyników:

- i) Stwierdzono, że emisja promieniowania gamma jest bardziej zmienna niż emisja radiowa. Mogłoby to sugerować, że emisja gamma prawdopodobnie pochodzi z bardziej zwartych regionów, podczas gdy emisja radiowa reprezentowała emisję ciągłą z wielkoskalowych dżetów.
- ii) Źródło wykazywało zmienność spektralną, charakteryzującą się trendem *softer-when-brighter* – rzadziej obserwowaną cechą wysokoenergetycznej emisji blazarów typu BL Lac.
- iii) Obserwacje radiowe badane za pomocą periodogramu Lomb-Scargle'a i ważonej transformaty falkowej Z ujawniły obecność silnego sygnału quasi-periodycznych oscylacji (QPO) z periodycznością ~ 270 dni, z możliwymi harmonikami o okresie ~ 550 i ~ 1150 dni.

Wynioskowałem, iż w czasie, gdy wykrywanie quasi-periodycznych oscylacji w blazarach jest wciąż przedmiotem debaty, obserwowane QPO o wysokiej istotności statystycznej (97%-99% globalnej istotności ponad bazowymi procesami szumów czerwonych) i utrzymujące się przez prawie 10 oscylacji, mogą być jednym z najpewniejszych przypadków detekcji QPO w krzywych zmian jasności blazara. Omówiłem także odpowiednie modele blazarów, które mogą prowadzić do zmienności w zakresie gamma i radiowym, quasi-periodycznych oscylacji oraz braku ewolucji wskaźnika barwy obserwowanego w emisji wysokoenergetycznej danego źródła.

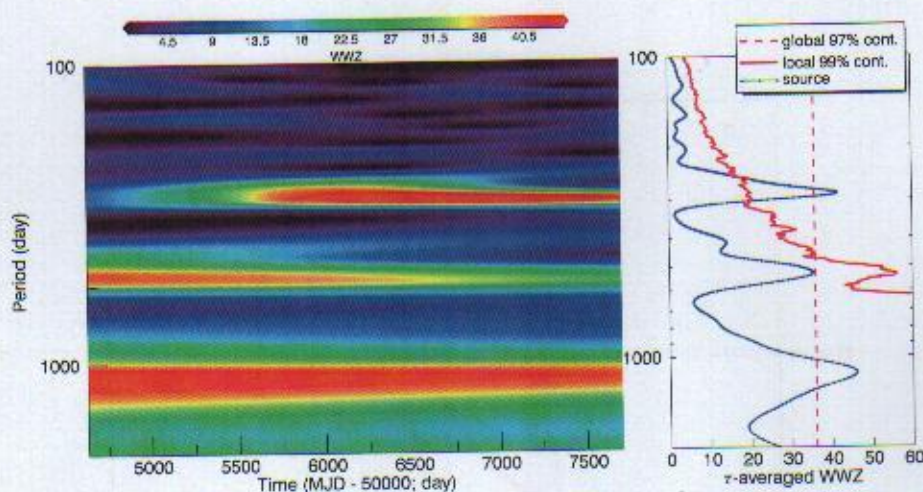


Figure 6: Ważona falkowa transformata Z (WWZ) krzywej blasku z OVRO dla blazara PKS 0219-164. Lewy panel przedstawia moc WWZ w płaszczyźnie czas-okres, natomiast panel prawy przedstawia moc uśrednioną w czasie (niebieska krzywa) jako funkcję okresu. Czerwona krzywa oraz purpurowa linia pokazują odpowiednio 99% lokalny i 97% globalny kontur poziomu istotności z symulacji MC (Bhatta 2017).

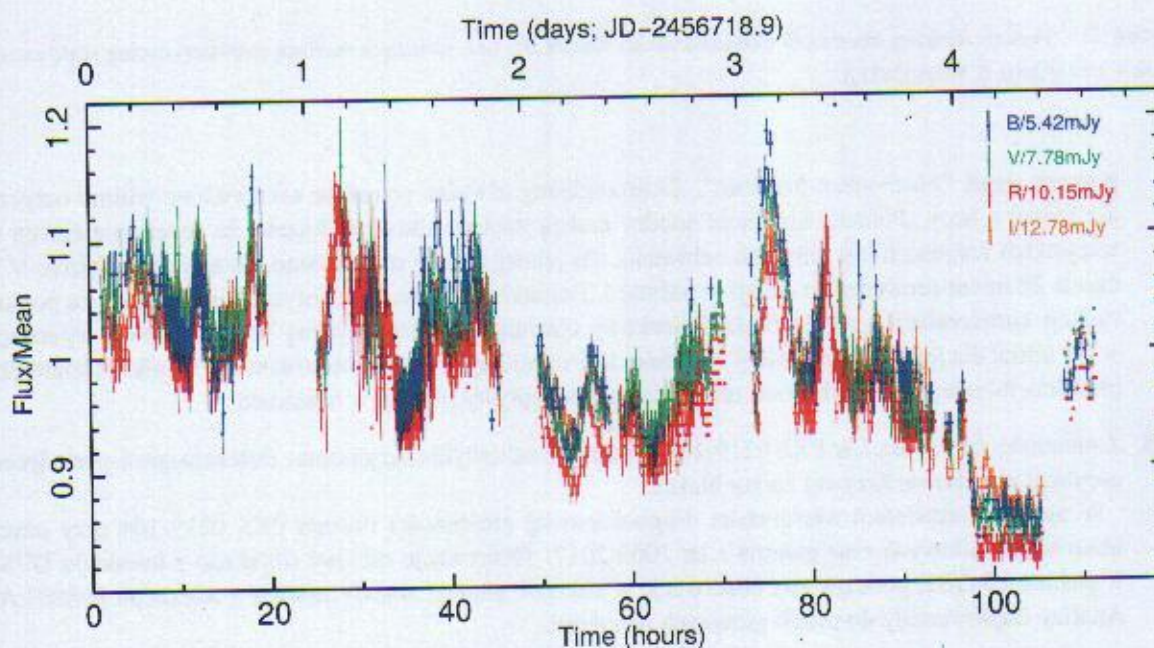


Figure 7: Równoległe wielopasmowe (BVRI) krzywe zmian blasku blazara 0716+714 o czasie obserwacji 130 godzin pochodzące z kampanii WEBT z 2014 r. (Bhatta i in., 2016c)

H6. Wielozakresowa fotopolarymetryczna kampania obserwacyjna WEBT blazara S5 0716+714

Mikrozmiennosc źródła i poszukiwanie charakterystycznych skal czasowych: Praca ta jest próbą przeprowadzenia najbardziej szczegółowego badania niewielkiej podstruktury blazarowych dżetów przy użyciu wielopasmowych obserwacji z niebywałą wręcz rozdzielczością czasową. Po sukcesie kampanii WEBT w 2009 roku ⁴, chcieliśmy dalej przestudiować jeden z mocno zmiennych blazarów – S5 0716+71, przy użyciu równoległe przeprowadzonych fotopolarymetrycznych obserwacji wielozakresowych. Koordynowałem fotopolarymetryczną kampanię WEBT skierowaną na obiekt w 2014 roku w celu monitorowania źródła jednocześnie w filtrach BVRI oraz bliskiej podczerwieni ⁵. Kampania zaowocowała niespotykanym zbiorem danych obejmującym 110 godzin niemal ciągłych, wielopasmowych obserwacji

⁴<http://www.oato.inaf.it/blazars/webt/webb.html>

⁵<http://www.oato.inaf.it/blazars/webt/gopal.html>

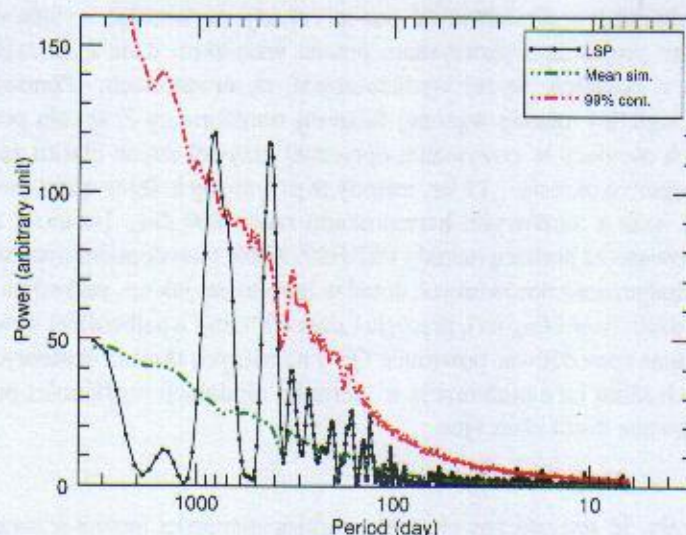


Figure 8: ~ 400 d QPO z prawdopodobnymi harmonikami ~ 800 d została wykryta dla ~ 9.2 -letniej krzywej blasku w paśmie optycznym blazara OJ 287. Czarna krzywa reprezentuje periodogram Lomb-Scargle'a długookresowej krzywej zmian blasku, zielona pokazuje uśredniony periodogram dla 10 000 zasymulowanych krzywych zmian blasku, a czerwona krzywa wyznacza kontur dla poziomu istotności 99% (from Bhatta et al., 2016c).

(pokazanych na rysunku 7), w tym dwa zestawy gęsto próbkowanych danych polarymetrycznych, głównie w filtrze R. Podczas kampanii źródło wykazywało wyraźną zmienność z różnicami *peak-to-peak* rzędu około 30% i *bluer-when-brighter* ewolucją spektralną, składającą się z modulacji o dziennej skali czasowej wraz nałożonymi na nią godzinowymi mikroflarami, charakteryzującymi się zmianami strumienia rzędu 0.1 mag. Przeprowadziliśmy dogłębne poszukiwania quasi-periodyczności w krzywej zmian blasku źródła; wskazówki dotyczące obecności oscylacji w skali czasowej między 3 a 5 godzin nie przedstawiają wysoce znaczących odstępstw od czysto czerwonego szumu widma energii. Zaobserwowaliśmy, że przy określonej konfiguracji kąta polaryzacji optycznej (PA) w stosunku do PA najgłębiej położonego dżetu radiowego w źródle, zmiany stopnia polaryzacji (PD) spowodowały zmienność całkowitego strumienia po około 2 godzinach; w międzyczasie, kiedy zmieniała się względna konfiguracja polaryzacji i kątów dżetu, nie można było zauważyć takiego opóźnienia. Momenty występowania mikroflar, analizowane jako oddzielne komponenty emisji, charakteryzowały się bardzo wysoką wartością PD ($> 30\%$) i wartościami kątów PA, które znacząco różniły się od PA podstawowego składnika tła czy też od położenia kąta pozycyjnego radiowego dżetu. Analizy zaowocowały szeregiem ciekawych wyników dotyczących najbardziej wewnętrznych struktur relatywistycznych dżetów. Niektóre z nich można wymienić poniżej.

- Ogólny statystyczny charakter mikrozmienności bardzo przypomina procesy typu czerwonego szumu w postaci $P(\nu) \propto \nu^{-\alpha}$. Ponadto udowodniono, że wcześniejsze twierdzenia o QPO w skalach czasowych kilku godzin były niejednoznaczne.
- Odkrycie niektórych silnie spolaryzowanych mikroflar sugeruje obecność izolowanych lecz o silnym polu magnetycznym regionów, tzw. wysp magnetycznych.
- Korelacja między strumieniem, polaryzacją i kątem polaryzacji ujawniła, że geometria pola magnetycznego została zawile skonfigurowana w sposób zależny od względnej orientacji pola magnetycznego otoczenia i podstawy dżetu.

H7. Detekcja prawdopodobnych quasi-periodycznych oscylacji w długookresowej optycznej krzywej zmian blasku BL Lac OJ 287:

Blazar OJ 287 jest jednym z najbardziej fascynujących obiektów, słynący z podwójnego maksimum obserwowanego w optycznej krzywej zmian jasności, powtarzającego się co każde ~ 12 lat. Jest to pier-

Handwritten signature/initials

wszy blazar powszechnie uważany za układ podwójny supermasywnych czarnych dziur. Astronomowie monitorują źródło od ponad wieku. Nasza grupa badawcza również monitoruje źródło z naszych obserwatoriów na Suhorze i w Krakowie od ponad dekady, wykonując wyjątkowo dobrze próbkowane obserwacje. W tym projekcie wykorzystano przede wszystkim dane z naszych własnych obserwacji przeprowadzonych w polskich, wyżej wymienionych, obserwatoriach. Ponownie, zastosowano periogram Lomb-Scargle'a i metody ważonej falkowej transformaty Z w celu poszukiwania możliwych quasi-periodycznych oscylacji w otrzymanej optycznej krzywej zmian blasku źródła. Interesujące było to, że poza modulacjami o okresie ~ 12 lat, metody te przyniosły kolejny quasi-periodyczny sygnał wokół okresów 400 dni i wraz z możliwymi harmonikami rzędu 800 dni. Istotność zaobserwowanych cech spektralnych oszacowano za pomocą metody PSRESP. Wiele prawdopodobnych scenariuszy próbujących wyjaśnić quasi-periodyczność omówionych dotąd w literaturze, jak np. podwójna czarna dziura, precesja lub "kołysanie się" dżetu (*wobbling jet*), precesja Lense-Thirring'a najbardziej wewnętrznych części dysku akrecyjnego itp., może spowodować powstanie QPO na różnych skalach czasowych. Przy czym dla QPO o skalach czasowych kilku lat z preferencją w kierunku modulacji wydajności powstawania dżetu przez wysoko namagnesowane dyski akrecyjne.

Uwagi końcowe:

Badania optyczne wykazały, że statystyczny charakter mikrozmienności można scharakteryzować za pomocą zwykłej funkcji potęgowej PSD w przestrzeni Fouriera oraz że obserwacje na wielu częstotliwościach są silnie skorelowane ze sporadycznym opóźnieniem między zakresami fali rzędu kilkudziesięciu minut. Wyniki sugerują, że szybka zmienność najprawdopodobniej pochodzi od wysoko namagnesowanej zwartej struktury dżetu, a mechanizmy szybkiego przyspieszania i chłodzenia cząstek mogą być powiązane albo z modelem *shock-in-jet* lub rekoneksją magnetyczną w turbulentnych obszarach dżetów. Z rozkładu wielkości regionów emisji uzyskanych na podstawie minimalnych skal czasowych okazało się, że niektóre regiony emisji były mniejsze niż promień grawitacyjny (r_g) AGN-u, z typową masą czarnej dziury $\sim 10^9 M_\odot$. Może to być możliwe, zawówno jeśli modulacje strumienia występują w małej części rejonu czarnej dziury, lub w scenariuszu, w którym fluktuacje odzwierciedlają niestabilności magnetohydrodynamiczne małej skali z turbulentnymi strukturami relatywistycznie poruszającymi się w przypadkowych kierunkach.

Alternatywnie, duże wartości czynników Lorentza (np. $\Gamma \sim 100$), związane z emitującymi regionami, takimi jak w modelu dżetu-w-dżecie (*jet-in-a-jet*), mogą spowodować, że wielkość tych regionów wyda się porównywalna do r_g . W BL Lacs, emisja twardego promieniowania rentgenowskiego może reprezentować emisję synchrotronową z wysokoenergetycznego końca rozkładu potęgowej energii elektronów. W takim przypadku czynniki Lorentza dla elektronów o największej energii można ograniczyć do $\sim 10^6$, a skale czasowe zmienności mogą być bezpośrednio powiązane z skalami czasowymi przyspieszania i chłodzenia cząstek. Natomiast w FSRQ emisja może być wynikiem odwrotnego rozpraszania Comptona fotonów z okolicy jądra galaktyki (np. z pyłowego torusa i regionu szerokich linii) przez elektrony z niskoenergetycznej części rozkładu. W takim scenariuszu energia cząstki okazuje się być rzędu kilkudziesięciu czynników Lorentza.

Nasze długookresowe badania zmienności promieniowania wielu blazarów na wielu częstotliwościach wnoszą, iż statystyczne długoterminowe właściwości zmienności są nadal zgodne z rozkładem potęgowym gęstości widmowej mocy (PDS). Jednakże kilka źródeł wykazuje quasi-periodyczne oscylacje na szczycie kontinuum funkcji potęgowej. Szczegółowa analiza takich oscylacji strumienia ma ogromne znaczenie, ponieważ sygnały te noszą znamiona procesów zachodzących w pobliżu centralnego silnika, którego bezpośrednie obserwacje są nieosiągalne. Oscylacje te mogą na podstawie różnych scenariuszy pochodzić np. z układu podwójnych supermasywnych czarnych dziur czy precesji dżetu oraz dysku akrecyjnego. Jednak w celu wyodrębnienia dokładnych przyczyn konieczna byłaby analiza spektralna i czasowa zbioru blazarów dla wielu zakresów częstotliwości.

Podsumowanie innych osiągnięć naukowych:

Poniżej opisałem moją działalność naukową przed i po uzyskaniu stopnia doktora.

Osiągnięcia badawcze przed uzyskaniem stopnia doktora:

Moje pierwsze doświadczenie badawcze w dziedzinie astrofizyki/kosmologii miało miejsce, kiedy byłem studentem studiów magisterskich na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Tribhuvan w Nepalu. W ramach projektu pracy magisterskiej pod kierunkiem prof. Udayaja Khana badałem wpływ stałej kosmologicznej na metrykę

Kerra. Podczas projektu próbowaliśmy numerycznie rozwiązać równania wynikające z metryki Kerr-de Sittera, opisującej trajektorię światła w pobliżu czarnych dziur. Jednakże nasze wyniki pokazały, iż nie było znaczących zmian w ich trajektoriach. Równania opisujące trajektorie masywnych cząstek okazały się bardziej skomplikowane i musieliśmy odroczyć ich zastosowanie do przyszłych projektów. Po kilku latach od uzyskiwania stopnia magistra fizyki, wstąpiłem na Wydział Fizyki na Florida International University (FIU) w USA w 2007 r., by kontynuować dalsze studia.

Jako doktorant FIU byłem zaangażowany w szeroki zakres działań badawczych, które obejmowały regularne wykonywanie obserwacji optycznych zbioru blazarów, modelowanie flar z ich krzywych zmian blasku a także pisanie kodu, pomoc studentom studiów licencjackich w ich projekcie badawczym i włączenie się do publicznych programów edukacyjnych, takich jak "Wieczór z gwiazdami". Współpraca ze studentami, którzy odwiedzili nasz wydział w ramach letniego programu badawczego, zaowocowała wieloma publikacjami: Rafle, H., Webb, J. R., Bhatta, G., Determining cell sizes in the Turbulent Jet of Blazar S5 0716+714, 2012, JSARA, vol. 7, p. 33-36; Dhalla, S, Webb, R., Bhatta, G., & Pollock, J., The Nature of Microvariability in Blazar 0716+714, 2010, JSARA, vol. 4, p. 7-11. Ponadto współpracowałem z międzynarodowym zespołem astronomów badających własności spektralne oraz czasowe blazara 0716+714. Mój wkład w badania polegał na obserwacji optycznej źródła podczas kilku nocy przy użyciu 0.9-metrowego teleskopu SARA. Wyniki kampanii realizowanej na wielu częstotliwościach opublikowano w "Villata M, Raiteri, C. M., Larionov, V. M., i in. Multifrequency monitoring of the blazar 0716+714 during the GASP-WEBT-AGILE campaign of 2007, 2008, A&A 481, L79L82".

Badania mikrozmienności blazarów, prowadzone przy użyciu obserwacji z jednego miejsca, były ograniczone przez długość nocy. W związku z tym, właściwości zmienności źródeł w skali czasowej 8-24 godzin (większe niż typowa długość nocy) są nieograniczone. Aby rozwiązać ten problem, przyjęliśmy nowatorskie podejście do prowadzenia obserwacji. Następnie wraz z moim promotorem studiów doktoranckich prof. Jamesem Webbem koordynowaliśmy kampanię obserwacyjną WEBT, prowadząc obserwacje na wielu lokalizacjach i zebraliśmy łącznie 72 godziny ciągłych (t.j. bez większych zakłóceń) obserwacji. Następnie zastosowaliśmy do uzyskanej krzywej zmian blasku nasz model mikrozmienności i uzyskaliśmy parametry fizyczne, takie jak wielkość regionów turbulentnych oraz parametry iniekcji. Wyniki badania opublikowano w "Bhatta, G., i in. textit The 72-h WEBT microvariability observation of blazar S5 0716 + 714 in 2009, 2013, A&A, 558A, 92B", a szczegóły kampanii wraz z modelowaniem zawarte są w mojej rozprawie "The nature of microvariability in the blazar 0716+714".

Osiągnięcia badawcze po uzyskaniu stopnia doktora:

Po uzyskaniu stopnia doktora w grudniu 2012 r. wyjechałem do Polski, aby objąć posadę post-doca w Obserwatorium Astronomicznym Uniwersytetu Jagiellońskiego w grupie Astrofizyki Wysokich Energii kierowanej przez prof. Michała Ostrowskiego. Od tego czasu współpracuję z grupą. Z biegiem lat przeprowadziliśmy wiele ciekawych badań w dziedzinie astrofizyki wysokich energii, często wykorzystując obserwacje z kilku teleskopów kosmicznych i naziemnych, w tym Fermi/LAT, NuSTAR, OVRO i teleskopów optycznych. Przeprowadziliśmy analizy czasowe, wzajemnych korelacji oraz analizy spektralne kilku blazarów. Moje badania w obserwatorium zaowocowały szeregiem publikacji, w tym wymienionych powyżej. Poza tym, przedstawiliśmy pracę *Discovery of a Highly Polarized Optical Microflare in Blazar S5 0716+714 during the 2014 WEBT Campaign*, 2015 ApJ, 809L, 27B. Współpraca naukowa z prof. Ostrowskim oraz prof. Stawarzem jest kontynuowana do dnia dzisiejszego.

Ponadto jestem również członkiem Konsorcjum CREDO (Cosmic-Ray Extremely Distributed Observatory), która to współpraca ma na celu zbadanie sygnatur skrajnie wysokich energii promieniowania kosmicznego za pośrednictwem globalnej sieci instrumentów. Szczegóły na temat tych badań, instrumentów oraz współpracy przedstawiono w sprawozdaniu CERN-u (arXiv: 1804.05614). Podobnie, wyniki badania symulującego pierwotne promieniowanie kosmiczne w wielkich pękach atmosferycznych występujących z powodu wysokoenergetycznego fotonu przechodzącego przez pole magnetyczne Słońca, będą gotowe do złożenia wkrótce (Dhital i in. w przygotowaniu, arXiv:1811.10334).

W zeszłym roku wygrałem grant NCN SONATA 13 "Poszukiwanie charakterystycznych skal czasowych oraz quasi-periodycznych oscylacji w blazarach: oddziaływanie dysk - dżet. (PI: G. Bhatta); który sfinansuje moją pracę jako PI przez 3 lata (2018-2021). Podbudowany, zacząłem analizować blazary z Fermiego i na chwilę obecną odkryłem periodyczne zmiany w strumieniu Mrk 501. (Bhatta, G., Blazar Mrk 501 shows rhythmic oscillations in its γ -ray emission, arXiv:1808.06067). Odkrycie zostało zrelacjonowane przez międzynarodowe media, włączając phys.org.

Bieżące działania i plany na przyszłość

W ramach zapronowanych NCN badań moje obecne prace koncentrują się wokół 'MWL variability study of blazar' jako sondy centralnej czarnej dziury, połączenia między dyskiem a dżetem oraz fizyką dżetu. Wykorzystując dziesięcioletnie dane obserwacyjne z teleskopu Fermi/LAT, przeprowadzam systematyczne badania krzywych zmian blasku w zakresie gamma pewnej liczby blazarów, skrupulatnie poszukując QPO oraz charakterystycznych skal czasowych. Po zakończeniu analiz w zakresie gamma przyszłe prace będą ukierunkowane na prowadzenie badań statystycznych krzywych zmian jasności (tych samych źródeł) w innych pasmach fali elektromagnetycznej, np. w radiowym, optycznym i rentgenowskim, tym samym poszukując funkcji spektralnej, która byłaby wspólna dla dwóch lub więcej zakresów długości fali. Możliwe wyniki, w połączeniu z wcześniej oszacowanymi parametrami fizycznymi, takimi jak masa, jasność oraz tempo akrecji, mogą pomóc w uzyskaniu pełnego zrozumienia procesów zachodzących w blazarach.

Ponadto obecnie jestem zaangażowany w analizę czasową i spektralną jednego ze słynnych blazarów – Mrk 421. Aby uzyskać obserwacje o wysokiej rozdzielczości na wielu długościach fal, koordynowałem kampanią WEBT w styczniu 2019 roku⁶. Kampania jest zorganizowana podczas tzw. *the long look* przez instrumenty AstroSatu, zgodnie z wygranym wnioskiem AstroSat autorstwa mojego kolegi Alexa Markowitza. Globalna współpraca związana była z udziałem kilku instrumentów, takich jak IRAM 30m Millimeter Radio telescope, Metsahovi Radio Observatory (37 GHz), Owens Valley Radio Observatory (OVRO), WEBT (radio, bliska podczerwień oraz zakres optyczny) oraz MAGIC. Praca jest w toku.

Wskaźniki bibliometryczne (na dzień 11 marca 2019):

Ilość cytowań:

z bazy Web of Science (WoS): 156 (126 z wyłączeniem własnych cytowań)

z bazy ADS: 211

h-index:

wg WoS: 6

wg ADS: 7

Całkowity Impact Factor (IF) dla wszystkich publikacji
na podstawie Journal Citation Reports (JCR) list: 44.45

References

- Abdo, A. A., Ackermann, M., Ajello, M., et al. 2010, ApJ, 722, 520
- Ackermann, M., Ajello, M., Albert, A., et al. 2015, ApJL, 813, L41
- Aharonian, F., Akhperjanian, A. G., Bazer-Bachi, A. R., et al. 2007, ApJL, 664, L71
- Aharonian, F. A. 2000, New Astron., 5, 377
- Tal Alexander, 2013, arXiv:1302.1508
- Bell, M. E., Tzioumis, T., Uttley, P., et al. 2011, MNRAS, 411, 402
- Bhatta, G. 2018, Galaxies, 6, 136
- Bhatta, G., Mohorian M., and Bilinsky I. 2018 A&A, 619, A93
- Bhatta, G., Stawarz, Ł., Markowitz, A., et al. 2018, ApJ, 866, 132
- Bhatta, G., & Webb, J. 2018, Galaxies, 6, 2
- Bhatta, G. 2017, ApJ, 847, 7
- Bhatta, G., Zola S., Stawarz, Ł., et al. 2016c, ApJ, 832, 47

⁶http://www.oato.inaf.it/blazars/webt/gopal_1101.html

- Bhatta, G., Stawarz, L., Ostrowski, M., et al. 2016b, ApJ, 831, 92
- Bhatta, G., Webb, J. R., Hollingsworth, H., et al. 2013, A&A, 558, A92
- Blandford, R. D., & Znajek, R. L. 1977, MNRAS, 179, 433
- Błażejowski, M., Sikora, M., Moderski, R., & Madejski, G. M. 2000, ApJ, 545, 107
- Bloom, S. D., & Marscher, A. P. 1996, ApJ, 461, 657
- Camenzind M., Krockenberger M., 1992, A&A, 255, 59
- Chatterjee, R., Jorstad, S. G., Marscher, A. P., et al. 2008, ApJ, 689, 79
- Czerny, B. 2006, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 360, 265
- Davies, S. R. 1991, MNRAS, 251, 64P
- Davies, S. R. 1990, MNRAS, 244, 93
- Dermer, C. D., & Schlickeiser, R. 1993, ApJ, 416, 458
- Edelson, R. A., & Krolik, J. H. 1988, ApJ, 333, 646
- Foster G., 1996, AJ, 112, 1709
- Fossati, G., Maraschi, L., Celotti, A., Comastri, A., & Ghisellini, G. 1998, MNRAS, 299, 433
- Ghisellini, G., Righi, C., Costamante, L., & Tavecchio, F. 2017, MNRAS, 469, 255
- Ghisellini, G., Tavecchio, F., Foschini, L., & Ghirlanda, G. 2011, MNRAS, 414, 2674
- Ghisellini, G., Villata, M., Raiteri, et al., 1997, A&A, 327, 61
- Heidt, J., & Wagner, S. J. 1996, A&A, 305, 42
- Hughes P. A., Aller H. D., Aller M. F., 1998, ApJ, 503, 662
- Hughes, P. A., Aller, H. D., & Aller, M. F. 1992, ApJ, 396, 469
- Kato S., 2001, Publ. Astron. Soc. Jpn. 53, 1
- Kastendieck, M. A., Ashley, M. C. B., & Horns, D. 2011, aap, 531, A123
- Larsson S. 1996, A&As, 117, 197
- Leahy, D. A., Elsner, R. F., & Weisskopf, M. C. 1983, ApJ, 272, 256
- Lainela, M., & Valtaoja, E. 1993, ApJ, 416, 485
- Lomb, N. R. 1976, Ap& SS, 39, 447
- Maraschi, L., Ghisellini, G., & Celotti, A. 1992, ApJ, 397, L5
- Mannheim, K., & Biermann, P. L. 1992, A&A, 253, L21
- McKinney, J. C., Tchekhovskoy, A., & Blandford, R. D. 2012, MNRAS, 423, 3083
- Marscher, A. P., & Travis, J. P. 1996, A&AS, 120, 537
- Marscher, A. P. 2014, ApJ, 780, 87
- Mücke, A., Protheroe, R. J., Engel, R., Rachen, J. P., & Stanev, T. 2003, Astroparticle Physics, 18, 593
- Padovani, P., Giommi, P., Resconi, E., et al. 2018, MNRAS, 480, 192
- Paltani, S., Courvoisier, T. J.-L., Blecha, A., & Bratschi, P. 1997, A&A, 327, 539

- Press, W. H. 1978, *Comments Astrophys.*, 7, 103
- Scargle, J. D. 1982, *ApJ*, 263, 835
- Sikora, M. 1994, *ApJS*, 90, 923
- Sikora, M., & Begelman, M. C. 2013, *ApJL*, 764, L24
- Simonetti, J. H., Cordes, J. M., & Heeschen, D. S. 1985, *ApJ*, 296, 46
- Timmer, J., & Koenig, M. 1995, *A&A*, 300, 707
- Uttley, P., McHardy, I. M., & Papadakis, I. E. 2002, *MNRAS*, 332, 231
- VanderPlas, J. T. 2018, *ApJS*, 236, 16
- Vaughan, S., Edelson, R., Warwick, R. S., & Uttley, P., 2003, *MNRAS*, 345, 1271
- Wagner S. J., Witzel A. 1995, *ARAA*, 33, 163
- Wang, J.-Y., An, T., Baan, W. A., & Lu, X.-L. 2014, *MNRAS*, 443, 58
- Zheng Z.-Y., Butler N. R., Shen Y. et al., 2016, *ApJ*, 827, 56
- Zola, S., Valtonen, M., Bhatta, G., et al. 2016, *Galaxies*, 4, 41