

Recenzja osiągnięcia naukowego
Wielopasmowa analiza gęstości widma mocy blazarów zmiennych w skalach
od dziesięcioleci do minut
oraz dorobku naukowego dr Arti Goyal

Dr Arti Goyal uzyskała stopień doktora nauk fizycznych w zakresie fizyki w Kumaun University (Nainital, Indie) w listopadzie 2010 roku. Tytuł jej rozprawy doktorskiej brzmi „Intra-night optical variability and the jet dominance in active galactic nuclei” i została wykonana pod kierunkiem prof. Ram Sagara. Dr Goyal już w styczniu 2010 roku wyjechała na dwuletni staż podoktorski do National Centre for Radio Astronomy, należącym do Tata Institute of Fundamental Research, a położonym w Pune w Indiach. Kolejny czteroletni staż podoktorski w latach 2013-2017 odbyła w Obserwatorium Astronomicznym Uniwersytetu Jagiellońskiego. W lutym 2018 roku dr Goyal została zatrudniona na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie na stanowisku technika w obserwatorium astronomicznym. W maju 2019 r. została zatrudniona na stanowisku adiunkta w tymże instytucie, którą to pozycję piastuje do dzisiaj.

Jako osiągnięcie będące podstawą postępowania habilitacyjnego dr Arti Goyal przedstawiła cykl czterech powiązanych tematycznie publikacji pod tytułem „Wielopasmowa analiza gęstości widma mocy blazarów zmiennych w skalach od dziesięcioleci do minut”. Publikacje te ukazały się w latach 2017–2021 w bardzo dobrych czasopismach o zasięgu międzynarodowym w dyscyplinach astronomia oraz nauki fizyczne. Trzy artykuły zostały opublikowane w periodyku *The Astrophysical Journal*, jeden w *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. Impact factor w 2020 r. tych czasopism to 5,877 (ApJ) oraz 5,287 (MNRAS). Dwie prace z czterech są jednoautorские, a zatem wkład kandydatki w ich powstanie jest 100%. Pozostałe dwie prace były wykonane we współpracy z innymi naukowcami. W materiałach habilitacyjnych znajdują się oświadczenia współautorów, które świadczą o tym, że wkład dr Goyal w powstanie tych prac był dominujący lub znaczący. Oświadczenia nie posiadają procentowych deklaracji, niemniej według moich oszacowań wkład habilitantki jest na poziomie 80-90%.

Osiągnięcie naukowe zaprezentowane przez dr Arti Goyal związane jest z badaniem przepływu akrecyjnego i wpływów występujących w blazarach oraz radiokwazarach o płaskim widmie (FSRQ). Obiekty te są podklasą galaktyk z aktywnym jądrem (AGN). Osiągnięcie to oparte jest na analizie zmienności strumienia promieniowania elektromagnetycznego w zakresie radiowym, podczerwonym, optycznym, rentgenowskim czy gamma. Habilitantka używa obserwacji wykonanych na jej zlecenie czy zlecenie innych naukowców. Obserwacje zostały wykonane wieloma detektorami i teleskopami: 104-centymetrowym teleskopem Sampurnanand (Indie), 70-centymetrowym krymskim teleskopem AZT-80 (Ukraina), 2,3-metrowym teleskopem Steward Observatory (USA), 2,3-metrowym teleskopem Calar Alto Observatory (Hiszpania), 60-centymetrowy teleskop na Suhorze, 50-centymetrowym teleskopem Uniwersytetu Jagiellońskiego, 26-metrowym radioteleskopem obserwatorium Uniwersytetu w Michigan (UMRAO), 40-metrowym

radioteleskopem Owens Valley Radio Observatory (OVRO), satelitami *Kepler*, *Swift*, *RXTE*, *Fermi*, teleskopami obserwatoriów promieniowania Cherenkova VERITAS czy H.E.S.S..

Praca H1 przedstawionego osiągnięcia dotyczy badania zmienności blazara PKS 0735+178 obserwowanego w skalach dekad-minut. Krzywe blasku blazara były zarejestrowane w zakresie promieniowania elektromagnetycznego optycznego, radiowego oraz gamma. Badano polaryzację optyczną oraz radiową. Dr Goyal przeprowadziła analizę gęstości widm mocy (PSD) krzywych blasku przy użyciu dyskretnej transformaty Fouriera, periodogramu Lomb-Scarglego oraz transformacji funkcji autokorelacji. Dr Goyal wraz ze swoimi współautorami jako pierwsi zaprezentowali widmo mocy blazara w optyce, pokrywające okres 22,6 lat. Praca ta wpisuje się w trend badania zmienności blazarów oraz galaktyk FSRQ. Dziesięcioletnie optyczne widma mocy ponad trzydziestu blazarów prezentowane były rok później np. w pracy Nilsson i in. (2018). W artykule H1 autorzy zauważyli, że widma mocy zmienności strumieni w zakresie optycznym, radiowym oraz gamma wykazują różne nachylenia w zakresie lat i tygodni. Wskazuje to na różne mechanizmy emisji promieniowania nisko oraz wysokoenergetycznego (np. emisja synchrotronowa vs. SSC). Postawiono hipotezę, że cała emisja w tym obiekcie jest generowana w rozciąglonym i turbulentnym dżecie. Obserwowane zmienności blazara w dziedzinie optyki byłyby generowane procesem o naturze losowej. Natomiast zmienności w bardziej energetycznym promieniowaniu gamma pochodziłyby od superpozycji wzmiankowanego procesu niskoenergetycznego.

Powyższa hipoteza jest testowana w pracy H2. Artykuł ten jest najczęściej cytowany z czterech, wchodzących w skład osiągnięcia naukowego habilitantki. Praca ta analizuje zmienność blazara OJ 287. Zebrano obserwacje strumienia optycznego źródła pokrywające kilka dekad lat. Oprócz obserwacji w optyce możemy znaleźć tu krzywe zmian blasku z zakresu rentgenowskiego (detekcja satelitą *Swift*), gamma (satelitą *Fermi*), radiowego (obserwacje radioteleskopami UMRAO i OVRO). W tej pracy autorzy użyli modelu CARMA (Continuous-time autoregressive moving average). Modelowanie CARMA (Kelly et al. 2014) uzupełnia przerwy w próbkowaniu krzywej, których nie jesteśmy w stanie uniknąć. Model CARMA ma wielu zwolenników, ale także oponentów, gdyż zakłada, że krzywa blasku jest realizacją procesu gaussowskiego, co nie zawsze jest prawdą (w sumie ponad 135 cytowań pracy Kelly et al.). Jeżeli to założenie jest poprawne, wtedy residua powinny układać się w rozkład normalny z zerową średnią i odchyleniem zerowym o wartości jedynki. Zbliżenie lub odejście od tego rozkładu może stanowić ocenę słuszności założenia poczynionego w modelu CARMA. Takie odchylenia widzimy w przypadku niektórych kwazarów czy gwiazd typu RR Lyrae (Kelly et al. 2014, Kasliwal et al. 2015, Kovacecic et al. 2017)). Dr Goyal i współautorzy sprawdzili słuszność realizacji wzmiankowanego założenia i w przypadku blazara OJ 287 jest ono potwierdzone. Autorzy pracy H2 dołączyli wnioskowanie bayesowskie. Dr Goyal dostarcza w pracy H2 po raz pierwszy długą, bo aż 117-letnią ciągłą krzywą zmian blasku blazara (krótsze krzywe porównaj z Mohan et al. 2016). Tym samym widmo mocy w zakresie optycznym również jest pozbawione problemów wynikających z nierównomiernego próbkowania (np. wypływanie mocy), a które to zostały dokładnie pokazane w pracy H1 za pomocą symulacji Monte Carlo. Zastosowanie modelu CARMA oraz pozbycie się przerw w krzywej blasku OJ 287 znalazło swoje uznanie i miejsce w pracy przeglądowej Hovatta & Lindfors (2019). Autorzy podkreślają „In this case, the PSDs are first calculated in the time domain, which makes treating unevenly sampled data easier”. Radiowe, optyczne oraz rentgenowskie gęstości widm mocy przyjmują właściwości szumu kolorowego (czerwonego, różowego). Natomiast widmo mocy emisji gamma jest zdominowane nieskorelowanym białym szumem na częstościach krótszym od 150 dni. Tym samym habilitantka stawia hipotezę, że za wysokoenergetyczną emisję gamma w blazarze OJ 287 są najprawdopodobniej odpowiedzialne elektrony znajdujące się w rejonach powstawania dżetów, tj. w obszarach do

około 1 pc mierząc od supermasywnej czarnej dziury. Rejony te z racji swojego położenia są wrażliwsze na zmienności zachodzące w dyskach akrecyjnych w porównaniu z odleglejszymi częściami dżetów. Dr Goyal i współautorzy pracy wnioskują, że emisja rentgenowska jest produkowana głównie w odwrotnym rozpraszaniu komptonowskim, natomiast promieniowanie optyczne i radiowe podczas akceleracji synchrotronowej w dżecie.

Analiza widm mocy dwóch kolejnych blazarów Mrk 421 oraz PKS 2155-304, obserwowanych w zakresie radiowym, podczerwonym, optycznym, rentgenowskim oraz gamma wykonana została w pracy H3. Dane pochodziły z ogólnodostępnych archiwów obserwatoriów OVRO, SMARTS, *RXTE*, *Swift*, *Fermi*, VERITAS oraz H.E.S.S., a pokrywających przedział około 24 lat monitoringu. W przeciwieństwie do prac H1 i H2 użyto tu techniki Power Spectral Response (PSRESP) (Uttley et al. 2002). Jest to technika wykorzystująca dyskretną transformatę Fouriera (DFT). Dzięki przeprowadzonym symulacjom Monte Carlo niepożądane efekty związane z DFT są uwzględniane. Otrzymanych wyników dotyczących badanych obiektów, nie można jednak wyjaśnić obecnością tylko pojedynczego obszaru akceleracji cząstek w dżecie. Rzeczywisty obraz jest bardziej skomplikowany. Kolorowy szum, brak charakterystycznych skal czasowych, brak quasi-periodycznych oscylacji wskazuje na obecność silnego, turbulentnego i niejednorodnego wypływu, który zawiera w sobie nietermiczne elektrony. Zaskakującym wynikiem jest ten widziany w PKS 2155-304. W skalach czasowych do tygodnia, gęstość widma mocy fotonów gamma z zakresu energetycznego 0.1-300 GeV jest większa niż gęstość widma bardziej energetycznych fotonów, widzianych przez obserwatorium H.E.S.S. (fotony o energiach > 300 GeV). Inaczej jest w blazarze Mrk 421.

Praca H4, druga z jednoautorskich, zajmuje się badaniem zmienności optycznych 9 blazarów oraz 5 źródeł FSRQ w obserwacjach intranight z czasem próbkowania od 5 do 15 minut. Dr Goyal skupia się tu na systematycznym badaniu charakterystyki optycznej gęstości widm mocy obiektów. Nie nastawia się tu na badanie pojedynczego stanu spektralnego w jakim znajduje się badane źródło. Dobrze byłoby się to uczynić, aczkolwiek trudno jest jednoznacznie określić stan spektralny danego AGNu. Mniejszą próbkę źródeł można znaleźć w pracach np. Kurtanidze (2001), Wehrle et al. (2019). Stosowana technika otrzymywania PSD stosowana przez habilitantkę jest taka sama jak w pracy H3. Wiemy, że w długich skalach czasowych szum galaktyk aktywnych jest czerwony (wykładnik $\beta \sim 2$, gdzie $PSD \propto \nu^{-\beta}$). Okazuje się, że badane przez dr Goyal widma intranight są jednak stromsze. Średnie wykładniki w krótkich skalach zmienności rzędu godzin i minut w przypadku blazarów oraz kwazarów FSRQ wynoszą odpowiednio 3,1 oraz 2,6. Habilitantka stwierdza, że takie nachylenia widm mocy mogą być zgodne z ideą pojawiania się turbulencji w dżecie w skalach czasowych krótszych niż kilka minut. Tym samym za zmienności emisji w barwie *R* byłby odpowiedzialny raczej dżet z nietermicznymi leptonami niż sam dysk akrecyjny.

O wadze poczynionych analiz oraz uzyskanych wyników świadczy ilość cytowań wspomnianych artykułów. Publikacje cyklu prac H1-H3 były cytowane do tej pory 73 razy (wg bazy *Web of Science*, stan na 30 stycznia 2022 r.) i jak najbardziej zostały zauważone przez międzynarodowe środowisko naukowe. Praca H2 była cytowana 45 razy. Oznacza to, że ta praca jest cytowana średnio 12 razy w roku. Prace H1 z 2017 roku oraz H3 z 2020 roku posiadają odpowiednio 18 i 9 cytowań. Praca H4 posiada jedno cytowanie. Niemniej ten fakt można tłumaczyć krótkim czasem jaki minął od publikacji do dzisiaj – mniej niż rok. Seria prac przedstawiona przez dr Arti Goyal jako jej osiągnięcie stanowi znaczący wkład w rozwój astrofizyki aktywnych galaktyk z dżetem i badania ich zmienności.

Ocena pozostałej części dorobku i aktywności naukowej habilitanta

Pozostały dorobek naukowy dr Arti Goyal stanowi 37 recenzowanych artykułów (nie licząc czterech prac wchodzących w skład osiągnięcia habilitacyjnego) opublikowanych w czasopismach, znajdujących się w bazie *Journal Citation Reports* (JCR) oraz 5 recenzowanych doniesień konferencyjnych. W dziewięciu z 37 artykułów habilitantka jest pierwszym współautorem. Dorobek naukowy habilitantki stanowi również kolejnych 9 prac i doniesień konferencyjnych, które nie znajdują się w wykazie JCR. Przykładem są dwie prace opublikowane w *American Astronomical Society* oraz jedno doniesienie w *The Astronomer's Telegram*. Sumaryczna liczba cytowań wszystkich artykułów to 656 (632 bez autocytowań), indeks Hirscha habilitantki wynosi 17 (dane wg bazy *Web of Science* na dzień 07.02.2022). Dane obszerniejszej bazy NASA/ADS, zawierającej preprinty, referencje katalogów, doniesienia konferencyjne, podają ilość cytowań wszystkich prac na ponad 1800, natomiast indeks Hirscha jest równy 21 (stan na 07.02.2022).

Warto w tym momencie podkreślić duży zakres zagadnień poruszanych w tych pracach: od tych rozważanych w osiągnięciu naukowym, poprzez analizę różnego typu źródeł radiowych widzianych w zakresie promieniowania milimetrowego, centymetrowego, metrowego, źródeł promieniowania Czerenkowa, badanie polaryzacji w optyce, badanie populacji młodych gwiazd w obszarach gwiazdotwórczych, po poszukiwanie quasi-periodycznych oscylacji w blazarach. Pozwala to stwierdzić, że dr Arti Goyal porusza się swobodnie w obszarach współczesnej obserwacyjnej astronomii radiowej, optycznej, rentgenowskiej oraz gamma, astrofizyki dotyczących galaktyk aktywnych z dżetami.

O dojrzałości naukowej kandydatki świadczy również to, że była ona zapraszana do wygłoszenia referatów na międzynarodowych konferencjach naukowych. Wygłosiła 4 wykłady zaproszone oraz ponad 7 krótszych doniesień konferencyjnych. Na konferencji „Monitoring the non-thermal Universe” w Cochem w Niemczech w 2018 r. poprowadziła jedną z sesji naukowych. Dwa razy była członkiem komitetu organizacyjnego konferencji w Krakowie „Relativistic Jets” (2015 r.) oraz szkoły „International SERC School on Astronomy and Astrophysics” w Indiach w 2010 roku. Należy wspomnieć, że dr Goyal była przez 3 lata członkiem kolaboracji H.E.S.S., w której wykonywała obserwacje w Namibii oraz przez kolejne 3 lata członkiem LOFAR, gdzie dokonywała identyfikacji źródeł radiowych oraz poszukiwała ich optycznych odpowiedników (tj. galaktyk macierzystych) na podstawie map przeglądu Pan-STARRS. Obecnie dr Goyal jest wykonawcą projektu naukowego o tytule “The radio sources associated with optical galaxies and having unresolved or extended morphologies” (ROGUE) prowadzonym przez Uniwersytet Jagielloński.

Habilitantka jest recenzentką artykułów naukowych w 5 czasopismach: *The Astrophysical Journal*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *Astronomy & Astrophysics*, *Galaxies* oraz *Publications of the Astronomical Society of Japan*. Była recenzentką 2 projektów obserwacyjnych zgłaszanych do komitetu działającego przy 3,6-metrowym teleskopie należącym do Aryabhata Research Institute of Observational Sciences w Indiach. Dr Goyal jest członkiem Astronomical Society of India oraz Polskiego Towarzystwa Astronomicznego. Była ona wykonawczynią dwóch grantów badawczych. W 2019 roku uzyskała travel grant od European Southern Observatory na przeprowadzenie obserwacji teleskopem VLT. Obecnie jest kierownikiem grantu NCN-OPUS.

Publikacje dr Arti Goyal, współpraca m.in. z obserwatoriami LOFAR, H.E.S.S., ARIES, jej naukowe osiągnięcia świadczą, że habilitantka wykazuje się istotną aktywnością naukową w więcej niż jednej uczelni czy instytucji naukowej, w tym zagranicznej. Kolejnym przykładem jest jej trzymiesięczny staż w 2013 roku w Inter-University Centre for Astronomy

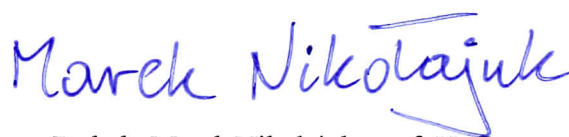
and Astrophysics w Indiach, gdzie zajmowała się testowaniem statystycznym krótkookresowych zmian blasku blazarów w optyce oraz analizą danych rentgenowskich.

Pozytywne wrażenie robi liczba teleskopów, monitorujących niebo w różnym zakresie promieniowania elektromagnetycznego, na których dr Arti Goyal wykonała osobiście swoje obserwacje, spędzając przy nich ponad 200 nocy. Są to teleskopy działające w zakres bliskiej podczerwieni i optycznym: 8,2-metrowy Very Large Telescope (Chile), 8,2-metrowy Subaru (USA), 2-metrowy Himalayan Chandra Telescope (Indie), 2-metrowy teleskop IUCAA Girawali Observatory (Indie), 104-centymetrowy teleskop Sampurnand (Indie), 130-centymetrowy Devesthal Fast Optical Telescope (Indie), 1,5-metrowy Kanata Telescope (Japonia), 50-centymetrowy Obserwatorium Astronomicznego UJ. W zakres radiowym były to Giant Metrewave Radio Telescope (Indie), Very Large Array (USA) oraz LOFAR (Holandia). W zakres gamma: H.E.S.S. w Namibii.

Dorobek dydaktyczny oraz popularyzatorski dr Goyal jest niewielki. Niemniej jest to zrozumiałe zważywszy, że jest osobą anglojęzyczną pracującą na polskojęzycznym kierunku studiów. Dorobek dydaktyczny habilitantki to opieka lub współopieka nad czterema studentami podczas letnich staży w Obserwatorium Astronomicznym UJ. Byli to studenci z Polski, Grecji, Ukrainy. Habilitantka była również promotorem pomocniczym na studiach doktoranckich jednej ze studentek Obserwatorium. Działalność popularyzatorska obejmowała oprowadzenie niepolskojęzycznych grup podczas Europejskiej Nocy Naukowców w OA UJ oraz współorganizację i uczestnictwo w Narodowym Dniu Nauki w 2011 r. w Pune w Indiach.

Konkluzja

Przedstawione w rozprawie wyniki naukowe stanowią samodzielny i znaczący wkład habilitantki w astrofizykę galaktyk aktywnych z dżetem, w tym w studia nad zmiennością strumienia promieniowania elektromagnetycznego, występującą w różnych skalach czasowych. Jest również niekwestionowanym ekspertem w dziedzinie obserwacji optycznych, radiowych i gamma. Jednoznacznie stwierdzam, iż przedstawione mi do oceny osiągnięcie naukowe oraz całość dorobku naukowego i aktywność naukowa habilitantki, spełniają ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane przy ubieganiu się o stopień doktora habilitowanego oraz spełniają kryteria stawiane w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Wnoszę o dopuszczenie dr Arti Goyal do dalszych etapów postępowania habilitacyjnego.



Dr hab. Marek Nikołajuk, prof. UwB