

Recenzja w postępowaniu o nadanie stopnia doktora habilitowanego dr Arti Goyal

Dr Arti Goyal w ramach postępowania o nadanie stopnia doktora habilitowanego przedłożyła osiągnięcie naukowe opisane w czterech artykułach naukowych. Artykuły te zostały opublikowane w wiodących czasopismach astronomicznych: The Astrophysical Journal i Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. Dwa artykuły są wieloautorskie (9 autorów oraz >10 autorów), a w dwóch dr A. Goyal jest jedyną autorką. Sądząc z liczby cytowań poszczególnych publikacji, wyniki te zaczynają być zauważane przez inne grupy pracujące w podobnej tematyce.

W pracach wieloautorskich dr A. Goyal jest pierwszą autorką, co sugeruje jej dominujący wkład do powstawania tych prac. Ma to swoje potwierdzenie w autoreferacie, gdzie kandydatka w ramach opisu wyników uzyskanych w poszczególnych publikacjach podaje również swój konkretny wkład do tych badań i publikacji. Nieco mniej użyteczne są oświadczenia współautorów, którzy zwykle, sumarycznie kontrybuują do wszystkich elementów pracy (np. uzyskanie danych, interpretacja wyników, pisanie tekstu), ale z obecnej formy oświadczeń nie sposób określić, jak istotny był wkład kandydata w stosunku do współautorów, w każdym z tych elementów. Jest to oczywiście problem ogólny, nie zawiniony przez obecną kandydatkę.

Tematyka badawcza, którą zajmuje się dr A. Goyal jest obecnie żywo rozwijana. Dotyczy niezwykle interesujących obiektów: blazarów – podklasy aktywnych galaktyk, emitujących przede wszystkim w bardzo wysokoenergetycznej części widma elektromagnetycznego (promieniowanie gamma, GeV i TeV). Promieniowanie gamma w blazarach produkowane jest przez dzety, ale szczegóły tego procesu są słabo poznane.

Próby zrozumienia geometrii i procesów fizycznych odpowiedzialnych za generację promieniowania zwykle podejmuje się z dwóch stron: teoretycznej i obserwacyjnej. W tej pierwszej próbuje się skonstruować model fizyczny procesów wychodząc z praw fizyki fundamentalnej oraz przeprowadzić w ich ramach obliczenia przewidywanej emisji, celem porównania z danymi obserwacyjnymi. Niestety, nasze zrozumienie fundamentalnych procesów fizycznych w takiej sytuacji (akrecja plazmy i pola magnetycznego na rotującą czarną dziurę) jest bardzo słabe i jesteśmy bardzo daleko od odtworzenia obserwowanej emisji. Dlatego z drugiej strony prowadzi się jak najbardziej szczegółową analizę danych obserwacyjnych tak, by móc chociaż trochę zawęzić zakres modeli teoretycznych.

Analiza *zmienności* emitowanego promieniowania jest jedną z metod wykorzystywanych do nałożenia ograniczeń na modele. W dziedzinach, w których dostępne są dobre dane (np. obserwacje rentgenowskich układów podwójnych, XRB), można zejść naprawdę daleko w analizie widmowo-czasowej, w kontekście modeli geometrycznych i fenomenologicznych, tak, że stanowi to istotne zawężenie zakresu możliwych modeli fizycznych.

W dziedzinie, w której pracuje dr A. Goyal sytuacja z danymi obserwacyjnymi jest mniej zaawansowana niż np. we wspomnianej analizie rentgenowskich układów podwójnych, czy galaktyk Seyferta. Wynika to ze skal wielkości i odległości do tych obiektów oraz generalnie słabej statystyki fotonowej w zakresie gamma, w stosunku do obecnego etapu rozwoju detektorów. Sytuacja obserwacyjna w tym zakresie w przypadku blazarów jest na bardzo wczesnym etapie, być może podobna to sytuacji dla XRB 30-40 lat temu. Badacze są na etapie uzyskiwania pierwszych szerokopasmowych widm mocy emisji gamma i

porównywania ich z danymi w innych przedziałach widmowych. Istotne jest wykorzystywanie wszelkich możliwych danych obserwacyjnych i metod analizy, ponieważ dane są heterogeniczne, pochodzą z różnych instrumentów, okresów czasu. Nie ma możliwości uzyskania danych równo-odstępnych, z długiego okresu obserwacji, co jest sytuacją optymalną z punktu widzenia metod analizy.

Na tym tle wyniki uzyskane przez dr A. Goyal są znaczące i dokładają szereg istotnych „cegiełek” do gromadzonej wiedzy, nawet mimo tego, że jeszcze nie wskazują spójnego modelu emisji blazarów.

Dr A. Goyal używa różnych metod do analizy zmienności, przeprowadza tę analizę zarówno w domenie czasowej jak i Fourierowskiej. W tym drugim wariantcie widma mocy obliczane są zarówno prostą metodą, bezpośrednio z periodogramów (H1), jak i metodą symulacji, która jest najdokładniejszą metodą fourierowską w przypadku niejednorodnych danych (H3 i H4). Oznacza to, że kandydatka bardzo dobrze opanowała warsztat analizy czasowej szeregów czasowych o nierównomiernym próbkowaniu – przynajmniej w zakresie widm mocy. Niewątpliwie wraz z ulepszaniem metod pozyskiwania danych w zakresie bardzo wysokich energii konieczne będzie pogłębianie wiedzy w zakresie metod korelacji krzyżowej (*cross-correlation*), opóźnień czasowych, analizy czasowo-widmowej, etc.

W poszczególnych artykułach dr A. Goyal, wraz z ew. współautorami, analizuje różne konkretne przypadki. **W pracy H1** analizowane są szerokopasmowe widma mocy PKS 0735+178 (obiekt typu BL Lac) w zakresie radiowym, optycznym i gamma. Samo połączenie różnych obserwacji w zakresie optycznym pozwoliło po raz pierwszy uzyskać widmo mocy zmienności w imponującym zakresie sześciu dekad. Nachylenie widma jest -2, a interesujące jest to, że do najniższych próbkowanych częstości (10^{-4} day^{-1} , czyli ok. 10^{-9} Hz) nie widać wypłaszczenia widma mocy, czyli przejścia z nachylenia -2 do -1, co powinno mieć miejsce. Kwestią wartą rozważenia jest, czy faktycznie takiego wypłaszczenia nie ma, czy też jakość danych nie wymusza jego obecności w modelu.

Najciekawszym wynikiem tej pracy jest stwierdzenie, że nachylenia widm mocy w zakresie radiowym i gamma są różne: w skali czasowej kilku miesięcy widmo mocy emisji w zakresie 0,1–200 GeV wykazuje ewidentną nadwyżkę nad emisją optyczną i radiową. Jest to istotny wynik świadczący o nieadekwatności prostego, jednostrefowego modelu emisji, a więc niewątpliwie motywacja do dalszych analiz, zarówno widm jak i zmienności emisji.

W pracy H2 badane są widma mocy znanego obiektu OJ 287, w wielu zakresach widmowych. W szczególności krzywa blasku w zakresie optycznym ma długość 117 lat, a dzięki dołączeniu danych z satelity Kepler możliwe było próbkowanie jasności w tym zakresie aż do krótkich skal czasowych rzędu jednej godziny. Do analizy wykorzystano metodę modelowania krzywej blasku w przestrzeni czasowej, tzw. *Continuous-time Auto Regressive analysis and Moving Analysis* (CARMA), jako wygodniejszą do badania długich krzywych blasku, z małym krokiem czasowym.

Odtworzone widmo mocy ma nachylenie bliskie -2, z widocznym obcięciem na skali czasowej krótszej niż 1 dzień. Ponownie nie widać też wypłaszczenia do nachylenia -1 w najdłuższych skalach czasowych. Interesujące jest też, że formalnie analiza metodą CARMA nie pokazuje w widmie mocy 12-letniej zmienności okresowej, raportowanej w wielu publikacjach. Autorzy pracy argumentują, że ma to związek ze słabą jakością danych. Wydaje mi się, że nie byłoby niemożliwe przeprowadzenie analizy tej krzywej blasku metodą

symulacji (100 lat obserwacji z krokiem czasowym 1 godzina, to ok. 10^6 punktów w krzywej blasku), a więc testowanie konkretnych modeli widma mocy.

Ponownie też widoczne jest „twardsze” widmo mocy, a więc nadwyżka zmienności, w zakresie gamma (Fermi-LAT, 0.1-300 GeV) nad zmiennością w zakresie optycznych, w skali czasowej kilku miesięcy.

W pracy H3 badana jest również zmienność emisji wysokoenergetycznej i radiowej, dla dwóch obiektów, Mkn 421 i PKS 2155-304, ale tym razem dr A. Goyal użyła również danych z eksperymentu VERITAS, a więc w zakresie TeV ($E > 400$ GeV). Kandydatka wykorzystwała tym razem metodę symulacji, a więc, w opinii tego recenzenta, najlepszą metodę do analizy widm mocy nieregularnie próbkowanych krzywych blasku. Również ta analiza potwierdza większą moc zmienności w zakresie wysokoenergetycznym (rentgenowskie, przez gamma do TeV) nad zmiennością w zakresie podczerwonym i optycznym. Jest to widoczne zarówno w postaci „twardszego” widma mocy, jak i też większej amplitudy.

W ostatniej przedstawionej **pracy H4** kandydatka analizuje z kolei zmienność krótkookresową w zakresie optycznym próbki blazarów, również metodą symulacji. Wynikiem jest stwierdzenie, że nachylenia widm mocy są strome (nachylenie -2.5 – -3.5), a więc widma pokazują obcięcie wysokoczęstościowe. Z jednej strony, jest to wynik spodziewany z warunku skończonej mocy zmienności, a drugiej strony cały czas potrzebny jest model odpowiedzialny za tę zmienność, a więc też za obserwowany zanik. Autorka sugeruje, że turbulencja prowadząca do szybkiej zmienności czynnika Lorentza może być dobrym modelem.

Sumarycznie, wyniki te zaczynają tworzyć spójny obraz obserwowanej zmienności blazarów, gdzie zmienność w wysokoenergetycznej części widma jest większa niż w zakresie radiowym, IR i optycznym, co objawia się jako twardsze widma mocy, z większą amplitudą. Jest to wynik znaczący, ponieważ wymusza odejście od prostych jednostrefowych modeli emisji na rzecz modeli bardziej skomplikowanych, a więc bardziej realistycznych.

Jak wynika z publikacji prezentujących osiągnięcie, dr A. Goyal może wykazać się dużym doświadczeniem w kierowaniu projektami wykonywanymi przez spore zespoły badawcze. Potrafi wymyślić projekt badawczy i zaplanować oraz koordynować jego realizację przez duży zespół. Jednocześnie potrafi pracować samodzielnie oraz uzyskiwać i publikować istotne wyniki, co jest optymalną kombinacją umiejętności dla lidera grupy badawczej.

Dr A. Goyal jest również aktywnym uczestnikiem wielu projektów badawczych, LOFAR, H.E.S.S., ROGUE.

Kandydatka ma duże doświadczenie w pozyskiwaniu danych obserwacyjnych z teleskopów optycznych i radioteleskopów, co świadczy o dobrym rozeznaniu w aktualnej tematyce badawczej i umiejętności atrakcyjnego formułowania aplikacji badawczych. Również uzyskanie grantu NCN jest tego znaczącym potwierdzeniem.

Dr A. Goyal ma również duże doświadczenie we współpracy międzynarodowej, współpracowała z wieloma zespołami z wielu krajów, chociażby w ramach projektów H.E.S.S. i LOFAR, co jest istotne w świetle wymogów ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

Kandydatka ma też doświadczenia w opiece nad młodszymi badaczami, na poziomie studentów i doktorantów (promotor pomocniczy). Zwyczajowo, stopień dr hab. oznaczał poziom kompetencji i doświadczenia badacza umożliwiające tworzenie własnego zespołu, w którym należało przydzielać zadania badawcze młodszym członkom zespołu oraz nadzorować ich realizację i rozwój umiejętności młodszych badaczy. Jakkolwiek Ustawa nie wyszczególnia tego aspektu pracy naukowca, jako niezbędnego do uzyskania stopnia dr hab., to doświadczenie kandydatki w tym zakresie jest niewątpliwie cenne.

W podsumowaniu stwierdzam, że dr A. Goyal spełnia wymogi stawiane kandydatom do stopnia doktora habilitowanego i wnioskuję o dalsze procedowanie jej wniosku.

Prof. dr hab. Piotr Życki