



Centrum Fizyki Teoretycznej
Polskiej Akademii Nauk

02-668 Warszawa, Al. Lotników 32/46

REGON 000844815

tel: (+48 22) 847 09 20, tel/fax: (+48 22) 843 13 69

email: cft@cft.edu.pl

www.cft.edu.pl

Warszawa, 26. czerwca, 2024

Recenzja Rozprawy Doktorskiej Pana Pawła Gliwnego,
zatytułowanej

**"Developing low-energy data analysis methods for Large-Sized
Telescopes and observations of Flat-Spectrum Radio Quasars with
Cherenkov telescopes"**

przygotowanej w Szkole Doktorskiej Nauk Ścisłych i Przyrodniczych
Uniwersytetu Łódzkiego

Tematem przedstawionej rozprawy doktorskiej jest opracowanie nowej techniki redukcji danych obserwacyjnych z teleskopu LST-1, będącego prototypem instrumentu LST (ang. *Large Size Telescope*) który wejdzie w skład sieci teleskopów czerenkowskich CTA na półkuli północnej. Cztery takie teleskopy o największej średnicy czaszy posłużą do badania emisji w zakresie bardzo wysokich energii, od 20 GeV do 300 TeV, docierającej ze źródeł kosmicznych. Teleskop przechodzi obecnie testy przed włączeniem aparatury do sieci, zaś wkład Autora rozprawy do projektu realizowanego przez międzynarodową kolaborację CTA polegał na wprowadzeniu udoskonalonych technik kalibracji danych, redukcji szumu oraz czyszczenia obrazu.

Ponadto, wyodrębniona część rozprawy jest poświęcona autorskiej analizie obserwacji próbki dziewięciu obiektów, typu FSRQ (ang. *Flat Spectrum Radio Quasars*), które zostały zebrane za pomocą teleskopu MAGIC. Autor koncentruje się na problemie absorpcji wysokoenergetycznego promieniowania, za co może być odpowiedzialny obszar BLR (*Broad Line Region* - obszar szerokich linii), znajdujący się w aktywnych centrach galaktyk, w pobliżu centralnej czarnej dziury.

W wyniku swoich badań, Autor wyznacza górne limity na emisję wysokoenergetycznego promieniowania gamma w badanych obiektach i porównuje je zarówno z modelem fenomenologicznym (o widmie w kształcie paraboli, dopasowanym poprzez ekstrapolację modelu uzyskanego dla danych z satelity Fermi-LAT) jak i z fizycznym modelem widma szerokopasmowego. Ten ostatni został zaproponowany dla dwóch obiektów spośród badanej próbki, CTA 102 oraz B2 2234+28A, gdzie pod uwagę brane są standardowe procesy promieniste w źródle.

Praca doktorska ma formę klasycznej rozprawy i składa się z trzech części. Stanowią je: Wstęp (rozdziały 1-3), Studium archetypowego źródła BL Lac, ilustrujące działanie teleskopu LST-1 (rozdział 4) oraz Modelowanie wysokoenergetycznych blazarów typu FSRQ dla próbki obserwacji z teleskopu MAGIC (rozdział 5), gdzie zawarto dodatkowy opis instrumentów Swift i Fermi-LAT oraz informacje na temat ulepszeń biblioteki *agnpy* dokonanych przez Autora. Rozdział 6 zawiera podsumowanie pracy i krótki opis planów na przyszłość.

Praca jest napisana w języku angielskim.

Całość poprzedza poręczny wykaz skrótów i najczęściej używanych symboli.

Pracę w ogólności oceniam wysoko. Oto kilka uwag i wątpliwości które nasunęły mi się w trakcie czytania rozprawy.

1. We Wstępie rysunek 2.1 przedstawia zunifikowany model Aktywnego Jądra Galaktyki, zaczerpnięty z książki [48] (niestety w spisie referencji brakuje dokładnej informacji bibliograficznej). Na rysunku tym wyodrębniono obszary i klasy obiektów, które Autor jedynie częściowo wyjaśnił w tekście. Nie wiemy w związku z tym, co to jest "electron plasma", ani czym charakteryzują się klasy Seyfert 1 i Seyfert 2, jak również gdzie przebiega ilościowo rozgraniczenie między obiektami typu "low power" i "high power". Te pojęcia powinny być objaśnione,

skoro Autor wybrał do wstępu tę właśnie ilustrację.

2. Również we Wstępie, rysunek 2.6, zaczerpnięty z pracy [117] Aleksic et al. (2014), ma zapewne ilustrować problem odległości obszaru, z którego pochodzą pierwotne fotony ulegające odwrotnemu rozproszeniu Comptona, od miejsca tego rozproszenia. Jak rozumiem z tekstu, miękkie fotony pochodzą z dysku akrecyjnego, zaś rozproszeniom mogą ulec albo w obszarze szerokich linii (BLR), bądź w torusie (IR). Rysunek jest jednak dość skomplikowany i zawiera szereg informacji, które nie są wyjaśnione w opisie: na przykład dlaczego głębokość optyczna dla fotonów o częstotliwości 37 Hz jest szczególnie istotnym parametrem, ani też co oznacza model (a) (a także model (b)) z tamtej pracy. Tych informacji brakuje dla zrozumienia celu ilustracji. Jeśli zaś nie były one istotne dla rozprawy, to lepiej było ten rysunek, za zgodą autorów publikacji, przerobić, lub wykonać własny.

3. W sekcji 2.2.1, Autor podaje przepis na widmo energetyczne blazarów. Pod wzorem (2.7), opisującym rozkład energii elektronów, Autor stwierdza, że parametrami rozkładu są m.in. pole magnetyczne, rozmiar blobu i jego czynnik Dopplera. To sformułowanie jest mylące, ponieważ wymienione wielkości nie występują we wzorze (2.7) i nie charakteryzują rozkładu nietermicznych elektronów, ale są parametrami modelu emisji procesu promienistego SSC – samokomptonizacji promieniowania synchrotronowego – w którym fotony synchrotronowe ulegają rozproszeniu na tych nietermicznych elektronach. Proces ten został niestety dosyć chaotycznie omówiony w poprzednim rozdziale (sekcja 1.7.1), gdzie Autor miesza ze sobą procesy Inverse Compton (IC) oraz SSC.

4. W podrozdziale poświęconym modelowaniu widm aktywnych galaktyk za pomocą pakietu *agnpy*, Autor wspomina o efekcie samoabsorpcji promieniowania synchrotronowego, dla którego testem ma być monochromatyczne źródło punktowe znajdujące się poza dżetem. Szkoda, że nie opisano, w jaki sposób taki test działa i jak efekt jest sprawdzany.

5. W podrozdziale 3.4.4, podane są wzory opisujące prawdopodobieństwo zarejestrowania sygnału, zdefiniowane jako statystyka Casha, jednak nie wszystkie symbole są wyjaśnione. W szczególności nie wiadomo jaka jest postać funkcji Psi(theta).

6. W sekcji 4.1.2 Autor opisuje proces redukcji danych obiektu BL Lac,

obserwowanego w sierpniu 2021 przez teleskop LST-1. Opis jest dość klarowny, jednak w pewnym momencie Autor stwierdza, że zamiast używać stabilnej wersji programu *Istchain*, użył wersji deweloperskiej, aby uzyskać dane na poziomie 3,4 i 5. Rozumiem, że ta stabilna wersja nie spełniała kryteriów dla otrzymania prawidłowego obrazu źródła, ale co to dokładnie oznacza? Co było w tej wersji poprawione i czy był to własny wkład Autora w uaktualnienie kodu?

7. Przedstawiając próbkę dziewięciu obiektów w rozdziale 5.2, Autor nie wspomina o obserwacjach w niskich zakresach energii. Czyżby żadne z tych źródeł nie było obserwowane w zakresie radiowym i optycznym?

8. W tabelce 5.1 jest podany indeks zmienności (*variability index*) dla badanych obiektów. Nie znalazłam w tekście rozprawy, jak jest zdefiniowany ten indeks.

9. Wyniki modelowania obszaru szerokich linii emisyjnych są bardzo skrótowo opisane. W jaki sposób Autor wyznaczył jasność bolometryczną dysku akrecyjnego, L_{disk} ? Ile i jakie linie emisyjne, oprócz linii żelaza i linii wodoru H-beta, były używane w modelu rewerberacji? W szczególności, może mieć też znaczenie linia węgla CIV. Czy wówczas wyniki się zmieniają? Wreszcie, Autor używa przybliżenia nieskończenie cienkiego obszaru powłoki emitującej linię. Jak to przybliżenie wpływa na wyniki?

10. Konkluzja do sekcji 5.4 (model fenomenologiczny BLR) jest napisana nieco niezrozumiale. Autor stwierdza, że obszar emitujący jest położony w niewielkiej objętości (około 1/10 BLR), zaś w następnym zdaniu czytamy że obszar emitujący jest w obrębie najbardziej zewnętrznych części BLR. Poglądowy rysunek geometrii tego obszaru, z uwzględnieniem położenia dysku akrecyjnego (najlepiej w jednostkach promienia Schwarzschilda) pozwoliłby lepiej zrozumieć ten wynik. Objętość wyrażona w jednostkach frakcji jasności BLR w stosunku do jasności dysku, pokazana na rysunku 5.14, daje jakiś obraz tej geometrii, ale nie jest on intuicyjny.

11. W sekcji 5.4.4 Autor stwierdza, że emisja z torusa pyłowego jest zawsze poniżej emisji synchrotronowej, co ma być testem dla konsystencji modelu. Czy chodzi tylko w emisję termiczną, czy również o proces zewnętrznej komptonizacji (EC) promieniowania torusa? W tym drugim wypadku, są obiekty gdzie widmo EC dominuje nad synchrotronowym (np. QSO B1420+326).

Znalazłam ponadto w tekście pewną ilość usterek technicznych, które wynikają najprawdopodobniej z pośpiesznego kopiowania skądś fragmetów tekstu lub automatycznego tłumaczenia translatorem. Na przykład, w rozdziale 4, na stronie 67 w przedostatnim akapicie widnieje niezrozumiałe zdanie odnoszące się do rysunku 4.1, zawierające zlepek polskich i angielskich słów, tak że trudno jest odcyfrować, co Autor miał na myśli odnośnie tego rysunku.

Inne rzucające się nieraz w oczy niedociągnięcia, to brak pełnej informacji w podpisach pod ilustracjami, które zawierają liczne rodzaje symboli czy linii. Na przykład, pod Rys. 4.3 - co oznacza linia przerywana? Podpis pod rysunkiem 4.6 informuje, że przedstawia on SED i LC (czyli widmo i krzywą blasku) - w rzeczywistości rysunek pokazuje jedynie SED. Z kolei rysunek 4.7 ma dziwacznie oznaczoną oś czasu: jednostką powinna być godzina, zaś datę obserwacji wystarczyłoby podać raz, w nagłówku. Nagłówek do tabelki 5.4 wygląda na niedokończony, zaś wielkości "ksi" i "ksi_dt" nie zostały zdefiniowane. Wreszcie, lista referencji, bardzo bogata, jest ułożona w chaotyczny sposób: nie jest to ani porządek alfabetyczny, ani wg. kolejności cytowania w pracy.

Pomimo powyższych krytycznych spostrzeżeń, uważam ogólnie, że przedstawiona rozprawa wnosi istotny wkład do poznania fizyki blazarów typu FSRQ, na podstawie analizy obserwacji w najwyższych zakresach energii. **Cennym wynikiem jest opracowanie szerokopasmowego modelu emisji dwóch obiektów, w których za absorpcję w zakresie gamma może odpowiadać obszar szerokich linii emisyjnych (BLR).**

Osiągnięciem Autora jest też niewątpliwie wkład w rozwój astronomii gamma, w szczególności jego udział w kalibracji prototypowego teleskopu LST-1. Jak pokazała praca wykonana na podstawie obserwacji znanego wcześniej obiektu BL Lac, detekcja sygnału mocno zależy od wybranego kierunku obserwacji (deklinacji), przy czym sygnał otrzymany w wyniku symulacji pęku może być albo osłabiony, albo wzmocniony, zależnie od wybranego zakresu energii. Problem ten może być przyczyną systematycznych błędów, a w szczególności utrudniać odkrycie nowych źródeł promieniowania gamma, zatem praca nad kalibracją błędów systematycznych ma szczególne znaczenie.

Praca zawiera dokładną i wszechstronną analizę dotychczas nieopublikowanych danych z teleskopu MAGIC, dzięki czemu możemy w pełniejszy sposób poznać

ograniczenia na modele emisji w dwóch przedstawionych galaktykach aktywnych. Były one już co prawda obserwowane przez wiele instrumentów w szerokim zakresie widma elektromagnetycznego, w tym przez teleskopy optyczne i radiowe, lecz obserwacje zaprezentowane w tej pracy doktorskiej pochodzą z kilku ostatnich lat i nie były publikowane. Zostały one wyekstrahowane i przeanalizowane przez Doktoranta niezwykle dokładnie i na kilka różnych sposobów, co jest bez wątpienia zaletą tej rozprawy.

Praca jest ładnie napisana, metodologicznie poprawna, zaś materiał w niej przedstawiony znalazł się w kilku publikacjach w czołowych czasopismach astronomicznych. W jednej z tych prac, która *ma być złożona do MNRAS*, Doktorant jest wiodącym autorem (korespondencyjnym). Konkludując, rozprawa p. Pawła Gliwnego spełnia ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane pracom doktorskim z dziedziny astronomii. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie jej Autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego, w tym do publicznej obrony.

Prof. dr hab. Agnieszka Janiuk

Centrum Fizyki Teoretycznej PAN

w Warszawie