



Kraków, 04-06-2024

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Pawła Gliwnego

pt. „*Developing low-energy data analysis methods for Large-Sized Telescopes and observations of Flat-Spectrum Radio Quasars with Cherenkov Telescopes*”

Rozprawa doktorska Pana Pawła Gliwnego dotyczy *astrofizyki* gamma bardzo wysokich energii (ang. *VHE – Very High Energy*, $\sim 30 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ do $\sim 1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$), która zajmuje się badaniem najbardziej energetycznej części widma elektromagnetycznego. Podstawowym narzędziem używanym w tych badaniach są teleskopy czerenkowskie, która pozwalają na naziemne obserwacje. Technika czerenkowska obserwacji błysków promieniowania gamma jest szybko rozwijającą się dziedziną astrofizyki eksperymentalnej. Obecnie budowane jest Obserwatorium CTA – *Cherenkov Telescope Array*, oparte na trzech typach teleskopów czerenkowskich nowej generacji. Największe, o 23-metrowej średnicy lustra, teleskopów *CTA-LST – Large-Sized Telescope* są przeznaczone głównie do obserwacji najniższych energii dostępnych dla CTA tj. około 20 GeV, czyli promieniowania dziesiątki-setki miliardów razy bardziej energetycznego niż światło widzialne. Prototypowy teleskop tzw. *LST-1* zlokalizowany na La Palmie w archipelagu Wysp Kanaryjskich, został zainaugurowany w październiku 2018 r. i przechodzi obecnie proces optymalizacji parametrów obserwacji i oddawania do użytku. LST-1 jest częścią planowanego północnego naziemnego obserwatorium promieniowania gamma jakim jest CTA.

Pierwszym istotnym wynikiem pracy doktorskiej mgra Pawła Gliwnego jest ulepszenie parametrów eksploatacyjnych LST-1. Autor rozwinął standardową bibliotekę analizy danych LST-1, poprzez opracowanie nowej metody obejmującej techniki kalibracji niskiego poziomu, takie jak korekcja surowego sygnału z systemu odczytu danych, aby zmniejszyć szumy sygnału, oraz kalibrację czasową, aby poprawić rozdzielczość czasową. Dodatkowo Autor udoskonalił metodę czyszczenia obrazów czerenkowskich na kamerze teleskopu proponując tzw. z ang. *pedestal cleaning*, w której uwzględnia tło nocnego nieba, wyznaczone na podstawie procesu kalibracji. Wszystkie te modyfikacje w łańcuchu analizy danych mają na celu obniżenia progu energetycznego dla detektora LST-1.

Drugim istotnym wynikiem Autora jest przeprowadzenie szczegółowej analizy emisji z 9 kwazarów o płaskim widmie radiowym (ang. *FSRQ – Flat Spectrum Radio Quasars*) za pomocą teleskopów MAGIC. Kwazary o płaskim widmie radiowym są obiektami znajdujące się w odległościach rzędu gigaparseków, a zatem ich emisja na swej drodze do obserwatora jest częściowo absorbowana w międzygalaktycznym polu promieniowania tła. Obiekty typu FSRQ są trudnym celem dla teleskopów czerenkowskich i wymagają bardzo dobrej niskoenergetycznej czułości teleskopów. Korzystając z obserwacji promieniowania gamma z aktywnych galaktyk przy użyciu teleskopów czerenkowskich możemy określić widmo energetyczne oraz krzywą blasku tych źródeł. Widmo energetyczne pozwala nam m.in. na poszukiwanie efektów absorpcji w samym źródle, która z kolei pozwala nam na określenie w której części źródła emisja jest produkowana. Z drugiej strony, analiza krzywej blasku opisuje nam zmienność emisji źródła w czasie i przez to oszacowanie rozmiarów obszaru emisji. Wykorzystując te informacje możemy modelować szerokopasmową emisję źródła w ramach różnych modeli teoretycznych. Standardowy model przewiduje, że z obiektów typu FSRQ fotony o energiach powyżej kilkunastu GeV nie powinny być obserwowane. Mimo to, taka emisja została zaobserwowana z kilku źródeł przez obecne teleskopy czerenkowskie. Z drugiej strony katalog 4FHL – *4th Fermi-LAT hard-source catalog*, sporządzony na podstawie danych z satelity Fermi-LAT obserwującego w niższym zakresie energii zawiera prawie 700 takich obiektów. Prowadzi nas to do ważnych pytań: Dlaczego emisję fotonów gamma bardzo wysokich energii widzimy tylko z kilku źródeł? Jakie procesy odpowiadają za przyspieszanie cząstek w tych źródłach? Gdzie znajduje się główny region produkcji promieniowania? Jaki jest związek między emisją promieniowania gamma o najwyższych energiach, a aktywnością w innym zakresie energetycznym?



Autor w rozprawie doktorskiej próbuje odpowiedź na te pytania wykorzystując pierwsze dane z CTA-LST-1 i oraz dane z teleskopów *MAGIC – Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov*.

Praca doktorska jest napisana w języku angielskim. Składa się z krótkiego streszczenia (w wersji angielskiej i polskiej), podziękowania, spisu rozdziałów, użytecznego wykazu skrótów, sześciu rozdziałów oraz spisu literatury. Rozdziały 1, 2, i 3 stanowią wprowadzenie do tematu rozprawy. Rozdział 4 opisuje prototyp LST-1, narzędzia programistyczne stosowane w Obserwatorium *MAGIC* i CTA, oraz przedstawia, usprawnianą przez Autora, metodę kalibracji stosowaną w LST-1. Rozdział 4 zawiera analizę danych LST-1 z obserwacji źródła BL Lac, szczegółowo opisując każdy etap przetwarzania danych z teleskopu LST-1. Rozdział 5 dotyczy wyników obserwacji promieniowania gamma VHE, analizę danych i wnioski z badań dziewięciu FSRQ obserwowanych przez teleskopy *MAGIC* i *Fermi-LAT* w latach 2008-2020. Rozdział 6 stanowi krótkie podsumowanie pracy i przedstawia plany naukowe Autora na przyszłość.

Rozprawa wraz ze spisem literatury liczy 128 stron, jest dobrze przygotowana od strony graficznej, ilustrowana właściwymi rysunkami z odpowiednich źródeł literaturowych, chociaż znajdujemy w pracy kilka rysunków mało czytelnych, szczególnie w początkowych rozdziałach pracy. Generalnie praca została poddana starannej redakcji, niemniej jednak w kilkunastu miejscach możemy zauważyć drobne literówki i błędy interpunkcyjne, szczególnie widoczne w podpisach pod rysunkami i w formułach matematycznych tzn. brak kropek lub przecinków. Czytania też nie ułatwia, moim zdaniem, zbyt mała czcionka zastosowana w pracy.

Jak wspomniano powyżej, trzy pierwsze rozdziały są wprowadzeniem do tematu.

Rozdział 1 przedstawia krótki opis astronomii promieniowania gamma i technik obserwacyjnych. Opisuje również procesy fizyczne, takie jak oddziaływanie cząstek i fotonów z materią oraz powstawanie pęków atmosferycznych inicjowanych przez fotony i promienie kosmiczne w atmosferze ziemskiej. W szczególności znajdziemy tutaj opis procesów interakcji naładowanych cząstek i elektronów z materią i polami promieniowania np. procesu przyspieszania Fermiego pierwszego i drugiego rzędu. Naładowane cząstki oddziałują z atomami poprzez różne procesy elektromagnetyczne, interakcje te mogą skutkować wyrzuceniem elektronów (jonizacja), podniesieniem elektronów w atomach do wyższych stanów energetycznych (wzbudzenie) lub emisję fotonów (bremsstrahlung, promieniowanie Czerenkowa). W niektórych przypadkach wysokoenergetyczne cząstki mogą również bezpośrednio oddziaływać z jądrami atomowymi. W tym rozdziale znajdziemy opis rozpraszania Comptona i produkcji par, które to procesy są podstawowymi interakcjami między fotonami a materią. Rozdział kończy krótki opis technik detekcji. Mianowicie fotony gamma mogą być obserwowane przy użyciu eksperymentów umieszczonych na satelitach. Z drugiej strony, do obserwacji najbardziej energetycznych fotonów gamma możemy wykorzystać absorpcję fotonów w atmosferze. Foton gamma wpadający w atmosferę oddziałuje z jądrami atmosferycznymi, produkując tysiące cząstek w tzw. pęk atmosferyczny. Te cząstki, które poruszają się z prędkością większą niż prędkość światła w atmosferze, powodują powstawanie słabych, nanosekundowych błysków niebieskawego światła (promieniowania Czerenkowa), które może być rejestrowane przez naziemne teleskopy czerenkowskie.

Rozdział 2 zawiera obszernie wprowadzenie do fizyki aktywnych jąder galaktyk skupiając się na blazarach, a w szczególności na ich podtypie FSRQ. Aktywne Jądra Galaktyczne (ang. *AGN – Active Galactic Nuclei*) są jednymi z najjaśniejszych obiektów we Wszechświecie. W ujednoczonym modelu AGN to układ składający się z supermasywnej czarnej dziury w centrum, otoczonej dyskiem akrecyjnym. Centralna czarna dziura rośnie poprzez intensywne zasilanie materiałem akrecyjnym. Energia grawitacyjna uwolniona z materii wpadającej do czarnej dziury może zostać przekształcona w promieniowanie i energię kinetyczną wypływu. Wypływy te objawiają się jako wąskie, dobrze skolimowane strumienie plazmy - dżety, poruszające się z prędkością bliską prędkości światła i niosące ze sobą znaczną część energii pierwotnie uwolnionej podczas procesu akrecji. Jeżeli relatywistyczne



dżety skierowanymi są w stronę obserwatora to takie obiekty przyjęto nazywać blazarami. Kwazary radiowe o płaskim widmie (FSRQ) stanowią klasę galaktyk aktywnych z dżetem, charakteryzujących się również bardzo jasnym dyskiem akrecyjnym, widocznymi i szybko poruszającymi się strukturami „chmur” materii formującą tzw. *BLR – Broad Line Region*, będących źródłem charakterystycznych dla FSRQ linii emisyjnych, oraz otaczającą gęstą strukturą pyłu znaną jako pyłowy torus. Intensywne pole promieniowania dysku akrecyjnego silnie determinuje właściwości obserwacyjne FSRQ. W rozdziale tym został przedstawiony standardowy model AGN, wprowadzono pojęcie widma spektralnego (ang. *SED – Spectral Energy Distribution*), klasyfikacje blazarów na FSRQ oraz obiekty BL Lac (w przeciwieństwie do FSRQ, widma obiektów typu BL Lac wykazują słabe linie emisyjne lub ich brak), a także omówiono aktualny stan wiedzy na temat tych obiektów, zwracając uwagę na wciąż otwarte pytania, takie jak lokalizacja regionu emisji oraz metody wyznaczania parametrów fizycznych na podstawie obserwacji.

Rozdział 3 zawiera bardziej szczegółowy opis techniki detekcji promieniowania gamma oraz przegląd obecnych teleskopów czerenkowskich koncentrując się na eksperymentach MAGIC i CTA. Na wstępie opisano proces emisji światła Cherenkova w atmosferze w przypadku pęków atmosferycznych indukowanych przez fotony gamma oraz rozkłady poprzeczne gęstości fotonów na poziome detektora. Następnie omówiono technikę pomiaru rozkładu kąтового przez teleskopy naziemne tzw. technikę obrazowania Cherenkova (*IACT – Imaging Air Cherenkov Telescope*), wyjaśniając w jaki sposób następuje identyfikacja pęków atmosferycznych indukowanych przez fotony spośród pęków hadronowych, które stanowią dominujące tło obserwacyjne (wprowadzono parametry Hillasa, wyjaśniono pojęcie separacji gamma-hadron opartej na algorytmach uczenia maszynowego *RF-Random Forest*). Opisano również metody i odpowiadające im biblioteki używane do analizy danych w astronomii gamma zaimplantowane w programach tj. *catpie*, *lstchain*, *MARS*, *Gampy*. Tutaj po raz pierwszy Autor przedstawia wyniki swoich prac. Znajdziemy tutaj informacje o procesie kalibracji niskiego poziomu dla LST-1, nad którym Autor pracował, w szczególności opis algorytmu czyszczenia obrazów, polegający na dynamicznej zmianie progu wyzwalania piksela i dodatkowych warunkach czasowych. Algorytm ten został zaimplementowany, przez Autora, w programie *lstchain* tym samym został włączony do standardowej procedury analizy danych z LST-1. Rozdział kończą trzy rysunki (rysunek 3.15, 3.16 oraz 3.17) ilustrujące efektywność zaimplantowanego algorytmu.

Rozdział 4 przedstawia wykonaną przez Autora analizę danych z LST-1 dla źródła BL Lacerate (BL Lac). Autor używa BL Lac jako przykładu, aby zbadać wydajność analizy teleskopu LST-1 oraz to, jak wydajność ta zależy od użytych symulacji Monte Carlo (MC). W tym rozdziale przedstawiono typową analizę danych, począwszy od surowego elektronicznego sygnału, aż do fizycznych wyników w postaci widmowego rozkładu energii. W analizie obiektu BL Lac wykazano, że stosowanie różnych symulacji MC wzdłuż określonych linii deklinacji wpływa na detekcję promieni gamma (widmo), szczególnie w niższych zakresach energii np. w zakresie energii 0,01-0,03 TeV dla deklinacji 48,22° dostajemy około 20% więcej zdarzeń niż w oparciu o próbkę MC z deklinacją 34,76°. Jednak otrzymane wyniki są zbieżne dla energii powyżej 0.3 TeV, co sugeruje, że wpływ wyboru określonej linii deklinacji w symulacjach MC jest bardziej znaczący dla niższych zakresów energii. Autor zwraca jednak uwagę, że ta analiza powinna być traktowana jako źródło niepewności systematycznych. Przy najniższych energiach bowiem zmiany tła pozostają najbardziej krytycznym czynnikiem wpływającym na przedstawione porównanie dla różnych linii deklinacji, ponieważ obie analizy opierają się na różnych próbkach MC użytych w metodzie uczenia maszynowego RF, a zatem są obciążone częściowo niezależnym tłem.

Rozdział 5 przedstawia główne wyniki pracy Autora dla kilku FSRQ obserwowanych przez teleskopy MAGIC i satelitę Fermi-LAT. Podczas, jak to już wspomniano we wstępie tej recenzji, gdy setki takich źródeł zostały wykryte przy energiach GeV, tylko garstka z nich wykazuje emisję w zakresie bardzo wysokich energii (VHE, energie ≥ 100 GeV). Rozdział ten przedstawia wyniki i interpretację uzyskane na podstawie 174 godzin obserwacji dziewięciu FSRQ przeprowadzonych za pomocą teleskopów



MAGIC w latach od 2008 do 2020 roku. Przedstawione wyniki wskazują na brak statystycznie istotnego ($\geq 5\sigma$) sygnału dla któregośkolwiek z badanych źródeł, co skutkuje górnymi ograniczeniami na emisję w zakresie energii VHE. W przypadku dwóch źródeł uzyskano dość rygorystyczne ograniczenia na emisję promieniowania gamma w postaci górnych limitów. Autor koncentrował się na modelowaniu emisji VHE z tych dwóch źródeł w poszukiwaniu dodatkowych śladów absorpcji w polu promieniowania szerokiego obszaru liniowego (BLR). W tych dwóch przypadkach otrzymane limity przez Autora na strumień fotonów gamma są poniżej przewidywań z ekstrapolacją widma mierzonego w zakresie GeV przez satelitę Fermi-LAT, taka ekstrapolacja w zasadzie uwzględnia tylko wpływ absorpcji promieniowania gamma w czasie propagacji fotonów do Ziemi tzw. *EBL – Extragalactic Background Light*. W przypadku tych konkretnych źródeł, ograniczenia dotyczące odległości między obszarem emisji a centralną czarną dziurą zostały wyprowadzone przy użyciu modelu fenomenologicznego. Następnie ograniczenia te zostały testowane przy użyciu ram opartych na modelu leptonowym. W rozdziale omówione również ulepszenia biblioteki *agnpy* wprowadzone przez Autora, aby umożliwić przeprowadzenie bardziej wiarygodnego modelowania emisji, w tym użycie bardziej realistycznego modelu BLR.

Pracę kończy krótki rozdział 6 podsumowujący pracę doktorską i zawierający krótką dyskusję na temat przyszłości astronomii gamma oraz przyszłych planów Autora.

Uwagi recenzenta:

Jak wspomniano powyżej, rozprawa została napisana w sposób staranny, choć w kilku miejscach nie obyło się bez drobnych niedociągnięć edytorskich.

- 1) Rozmiar etykiet na niektórych rysunkach powinien być większy, gdyż czasami są one na granicy widoczności. Jako przykład można podać rysunek 2.1 ze strony 16 gdzie opisy są właściwie nieczytelne, warto nadmienić, że jest to jeden z najważniejszych rysunków w pracy przedstawiający zunifikowany model AGN,
- 2) Opis rysunku 3.16 na stronie 65, gdzie przedstawiono efektywność opracowanego przez Autora procesu czyszczenia obrazu, jest moim zadaniem niekompletny, brak wyjaśnień co oznaczają sekwencje na poziomej osi np. „6-3” i „8-4”, że odpowiadają one rezultatom otrzymanych dla różnych kombinacji parametrów *picture_thresh* i *boundary_thresh*,
- 3) Moim zdaniem, w rozdziale 1.7 dla lepszej ilustracji procesów leptonowych i hadronowych odpowiedzialnych za produkcję fotonów gamma w AGN, dobrze by byłoby dołączyć poglądowy rysunek obrazujący te procesy,
- 4) Bardzo często w wielu miejscach tekstu, szczególnie na końcu formuł matematycznych występuje brak kropki lub przecinka, albo występuje przecinek zamiast kropki, zdarzają się również zdania z dodatkową kropką kończącą zdanie np. strona 62, „*pipeline..*” → „*pipeline.*”, czy w kilku miejscach popełniono drobne literówki jak np. na stronie 94 jest „*valu*” powinno być „*value.*”...
- 5) Na stronie 15 mamy skrót „SSD” jako tytuł rozdziału, powinno raczej być „*Spectral Energy Distribution*”,
- 6) Strona 91: brak „\” mamy *Lyepsilon to Halpha* powinno być *Ly\epsilon to H\alpha*,
- 7) Podpis pod rysunkiem 5.12, brak „/” powinno być $R_{\{H \beta\}}$,
- 8) Na stronie 67 mamy polski tekst „...bardzo wysokich energii.”.



Jednak mimo tych drobnych potknięć edytorskich pracę czyta się dobrze, na uwagę zasługuje też odpowiednie zbalansowanie pracy tzn. czytelnik dostaje konieczną informację w celu zrozumienia jej treści.

Poniżej wymieniam tylko kilka drobnych uwag i niejasności, które nasunęły mi się po przeczytaniu pracy.

- 1) W rozdziale 3 opisano algorytm czyszczenia obrazów z kamery LST-1. U podstaw tego algorytmu leży zastąpienie stałej wartości progu wyzwolenia piksela (8 p.e.) przez indywidualną wartość liczoną dla każdego piksela według formuły 3.5 i zastosowanie dodatkowego kryterium czasowego (czas wyzwolenia piksel sąsiadującego nie dalej niż 2 ns). Na rysunku 3.15 mamy ilustrację zastosowania tego algorytmu dla standardowego źródła jakim jest Mgławica Kraba i źródła ekstragalaktycznego (BL Lac), gdzie widzimy, że algorytm efektywnie usuwa izolowane piksele z obrazu kamery. Na rysunku 3.16 pokazano wyniki dla różnych wartości dwóch istotnych parametrów czyszczenia obrazu tzw. *picture_thresh* i *boundary_thresh* tj. 6 i 8 oraz 3 i 4 oraz warunku czasowego. Moje pytanie brzmi, jak opracowany algorytm czyszczenia wpływa na wyższe poziomy analizy danych, w szczególności parametry Hillasa? Tutaj poza stwierdzeniem Autora cyt. „*I examined what pedestal cleaning approaches have an impact on image parameters.*”, i poglądowym Rysunkiem 3.17 brakuje w pracy odpowiedzi na to pytanie. Moim zdaniem, dodatkowy rysunek obrazujący wpływ algorytmu czyszczenia *pedestal cleaning*, w stosunku do standardowej procedury zaimplementowanej w *tailcuts*, byłby pożytecznym domknięciem rozdziału. W podpisie do rysunku 3.17, w przypadku rezultatów pokazanych w ostatniej kolumnie, nie jest jasne jakich wartości parametrów *picture_thresh* i *boundary_thresh* użyto do analizy prezentowanych obrazów z LST-1.
- 2) W rozdziale 4 przedstawiono rezultaty otrzymane z wykorzystaniem symulacji MC dla różnych linii deklinacji. Rozumiem, że przy „szybkiej” analizie w czasie rzeczywistym, w celu podjęcia decyzji o dalszych obserwacjach źródła, takie symulacje w celu wstępnej analizy są jak najbardziej uzasadnione, ale dlaczego w końcowej analizie nie można wygenerować symulacji MC dla pozycji źródła i rozwiązać problem różnego tła dla różnych deklinacji?
- 3) W rozdziale 5 na rysunku 5.12 (strona 92) przedstawiono wyliczoną głębokość optyczną w funkcji odległości od czarnej dziury. Przedstawiona zależność wykazuje szereg pików, które jak Autor twierdzi związane jest z niestabilnością procedury liczącej współczynnik absorpcji. Czy Autor mógłby wyjaśnić bardziej poglądowo problem tych niestabilności?
- 4) Jedną z konkluzji z Rozdziału 6, w oparciu o model fenomenologiczny analiza obserwacji wykonanych na CTA 102 i B2 2234+28A w zakresach HE i VHE prowadzi nas do wniosku, że absorpcja w obszarze BLR jest słaba. Czy istnieje alternatywne wytłumaczenie tego faktu np. jak Autor zauważył, wyciągnięte wnioski w dużym stopniu zależą od zastosowanego modelu i mogą być również konsekwencją np. ograniczenia energii elektronów. Czy Autor rozważał inne scenariusze wychodząc poza ramy modelu leptonowego np. czy tzw. model hadronowy mógłby być odpowiedzialny za tego typu efekt?
- 5) W rozdziale 6 Autor badał właściwości emisji gamma z FSRQ o płaskim widmie radiowym, źródeł jeszcze wciąż słabo zbadanych przez teleskopy czerenkowskie. Moje pytanie brzmi czy planowane są podobne analizy z wykorzystaniem danych z LST-1. Teleskop ten z założenia będzie o rząd wielkości czulszy, więc wydaje się, że ma większe szanse na wyjaśnienie pochodzenia emisji promieniowania od FSRQ. Czy Autor planuje przygotowanie propozycji obserwacyjnej wybranych FSRQ źródeł przy użyciu teleskopu LST-1?



INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

Przedstawione powyżej uwagi nie umniejszają wartości pracy. Jeżeli chodzi o aspekt naukowy to uważam, że praca jest cennym wkładem Autora w odpowiedzi na pytania postawione we wstępie tj. dlaczego emisję fotonów gamma bardzo wysokich energii widzimy tylko z kilku źródeł FSRQ? Jakie procesy odpowiadają za przyspieszanie cząstek w tych źródłach? Gdzie znajduje się główny region produkcji promieniowania?

Bez wątpienia dużym osiągnięciem Autora jest też wkład w opracowywanie metody analizy danych dla LST-1, takich jak korekcja sygnału i czyszczenie obrazu. Ma to kluczowe znaczenie dla poprawy wydajności tego teleskopu, zwłaszcza w zakresie niskich energii promieniowania gamma. Analiza ta jest również niezależnym potwierdzeniem, że działanie tego teleskopu nowej generacji jakim jest LST-1 jest zgodna z oczekiwaniami, a dodatkowo pokazuje, że Autor biegle posługuje się i stosuje narzędzia analizy danych, otrzymując cenne rezultaty naukowe.

Analiza przedstawia w Rozdziale 6, mam taką nadzieję, zostanie wkrótce opublikowana przez kolaborację MAGIC. Pan mgr Paweł Gliwny będzie autorem korespondencyjnym tej publikacji. W chwili obecnej praca pt. *Constraints on VHE gamma-ray emission of Flat Spectrum Radio Quasars with the MAGIC telescopes* została umieszczona w bazie arXiv (arXiv:2403.13713) z adnotacją o planach wysłania jej do czasopisma *MNRAS – Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* – jedno z wiodących na świecie czasopism naukowych dotyczących astronomii i astrofizyki. Warto też nadmienić, że Autor jest członkiem dwóch dużych kolaboracji naukowych MAGIC i CTA, a jego prace były prezentowane na zebraniach tych kolaboracji jak również częściowo na konferencjach międzynarodowych.

Podsumowując recenzowana rozprawa Pana Pawła Gliwnego stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, przekonuje o szerokiej wiedzy Autora, a także o Jego umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Uważam, że postawione cele naukowe zostały przez Autora w pełni osiągnięte, a przedstawione w końcowym rozdziale pracy plany na przyszłość dają gwarancję dalszego rozwoju naukowego.

W mojej ocenie praca doktorska Pana Pawła Gliwnego spełnia wymogi formalne i zwyczajowe stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie Pana Pawła Gliwnego do dalszych etapów postępowania doktorskiego.

Prof. dr hab. Dariusz Góra