

### Ocena rozprawy doktorskiej mgr Natalii Żywuckiej-Hejzner

Rozprawa *Morphological study of TeV emission from 1ES 0414+009 and Centaurus A with H.E.S.S. data* została napisana w języku angielskim, pod kierunkiem prof. dra hab. Michała Ostrowskiego.

W części I Autorka zawarła informacje niezbędne, a czasem tylko pomocne dla zrozumienia istoty jej pracy badawczej. Znajduje się tam omówienie: procesów radiacyjnych wysokich energii ważnych w kontekstach astrofizycznych, zasadniczych elementów budowy morfologicznej aktywnych jąder galaktyk oraz techniki obserwacyjnej leżącej u podstaw teleskopu H.E.S.S. Na podkreślenie zasługuje trafny i dobrze zredagowany wybór informacji i w ogólności przejrzyste przedstawienie zagadnień (ale patrz niżej) przy jednoczesnej zwięzłości tekstu. Dotyczy to (w tej części) przede wszystkim rozdziałów 1. *High energy astronomy* i 2. *Active Galactic Nuclei*. Pewien kłopot sprawił piszącemu te słowa rozdział 3. *Imaging Atmospheric Cherenkov Observatories (IACTS)*. Nie mogę stwierdzić, że ten rozdział jest źle napisany, ale dla czytelnika nie zajmującego się zawodowo dokładnie tematyką rozprawy, jest zbyt skrótowy. Przy definiowaniu i omawianiu kolejnych pojęć i zagadnień, Autorka często przytacza terminy techniczne, wzory i ilustracje z literatury przedmiotu i to oczywiście dobrze. Do pełnego zrozumienia toku argumentacji czytelnik musi jednak zapoznać się z tą literaturą *in extenso*, co w pewnym stopniu starałem się uczynić, ale wyznaczony termin przygotowania recenzji pozwolił uczynić to właśnie jedynie 'w pewnym stopniu'. Uwaga powyższa odnosi się do większości stwierdzeń Rozdziału 3, dotyczących zastosowanych statystyk - ich efektywności czy obciążeń.

Aby powyższa krytyka nie została uznana za poważny zarzut w stosunku do całej rozprawy dodam, że Autorka w Rozdziale 3. stanęła prawdopodobnie przed zadaniem praktycznie niewykonalnym. Być może czytelnik spoza wąskiego grona użytkowników teleskopów rejestrujących promieniowanie Czerenkowa powinien najpierw nie tylko dogłębnie zapoznać się z techniką obserwacyjną, ale wręcz uczestniczyć w prowadzeniu i opracowywaniu obserwacji. Sytuacja w dużej mierze jest analogiczna do znanych mi z własnych doświadczeń, obserwacji rentgenowskich wykonywanych za pomocą obserwatoriów orbitalnych. Tam również droga od surowych danych obserwacyjnych do końcowych parametrów fizycznych badanych źródeł jest na tyle długa i wieloetapowa, że trudno dostrzec wszystkie uwarunkowania mające wpływ na wyniki końcowe, w szczególności na ich dokładność. Nie są tego niestety świadomi liczni astrofizycy zajmujący się konfrontowaniem modeli teoretycznych z materiałem obserwacyjnym.

Część II rozprawy składa się z trzech rozdziałów i zawiera oryginalne badania dwóch źródeł promieniowania w obszarze TeV, 1ES 0414+009 i Centaurus A, skierowane na potwierdzenie i zbadanie rozciąglej emisji obu obiektów, pobliskiego radioźródła i blazara o przesunięciu widma ku czerwieni (redshifcie)  $z = 0.287$ . Dla celów porównawczych analizie poddano również 4 inne blazary o redshiftach w zakresie 0.069–0.188. Kątowa zdolność rozdzielcza teleskopu w konfiguracji CT 1-4 wynosi  $\sim 0.1^\circ$ , co odpowiada rozmiarom liniowym w jednostkach współporuszających od  $\sim 500$  kpc do 2500 kpc (przy  $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ). Rozciągle emisja o rozmiarach charakterystycznych dla gromad galaktyk stanowiłaby ważną informację dotyczącą międzygalaktycznych pól magnetycznych.

W rozdziale 4. *Methodology of AGN morphology study* (otwierającym część II) przedstawiono kryteria doboru materiału obserwacyjnego i kierunki prowadzonych analiz. W szczególności określono rodzaje rozpatrywanych widm i sposób parametryzacji struktur rozciąglych.

Ze względu na ambitny cel określenia zarówno parametrów widma VHE oraz ewentualnego stwierdzenia emisji rozciąglej, do analizy wybrano jedynie obserwacje wysokiej jakości (tj. o dużych czasach ekspozycji (*live time*) przy stałych warunkach pogodowych, przy użyciu co najmniej trzech teleskopów i niskiej liczbie nieaktywnych detektorów promieniowania (fotopowielaczy). Wyselekcjonowane obserwacje poddano analizie korzystając z dwu metod statystycz-

nych dających najlepsze oceny mierzonych parametrów. Czytelnik nie zostaje zaznajomiony w szczegółowy sposób z własnościami zarówno użytych statystyk, jak też zastosowanych 'obcięć' mierzonych parametrów. 'Obcięciami' w tym wypadku są wartości progowe niektórych parametrów wyznaczanych wprost z obserwacji, poza którymi uważa się dany pomiar za obciążony zbyt dużą niepewnością. Do takich parametrów należy w szczególności zarejestrowany kształt 'chmury' promieni Czerenkowa wywołanej wpadającą w atmosferę cząstką, a także zmierzona odległość kątowna kierunku detekcji od faktycznego położenia źródła. Mimo że recenzent nie jest w stanie ocenić ilościowo, na ile wybrane parametry i obciążenia zostały zoptymalizowane, nie ma wątpliwości, iż przyjęte procedury zostały przetestowane i zapewniają najlepsze wykorzystanie dostępnego materiału obserwacyjnego.

Rozdział 5. *Results of spectral and morphological analysis* jest merytorycznie najważniejszy i decyduje o wartości pracy. W rozprawie stwierdzono, że źródło 1ES 0414+009 jest jednym z najsłabszych zarejestrowanych powyżej 0.2 TeV. Czy wobec tego nie nazbyt pochopnie powzięto podejrzenie o jego rozciągłości? Czy jet o widomej długości 70 kpc stanowi silny argument za rozciągłością emisji TeV w skali powyżej 2 Mpc? Na podstawie rozkładu jasności na załączonych ilustracjach trudno wizualnie określić kierunek 'rozciągłości' w zakresie gamma. Przy obcięciu 'standard' nie dostrzegam nadwyżki emisji w kierunku wschodnim, przy 'loose' - kąt pozycyjny elipsy emisji wydaje się być bliżej 45° niż 90°. a przy 'hard' emisja nie wykazuje uprzywilejowanego azymutu. Oczywiście w pracy struktura źródła zostaje zbadana w sposób ilościowy.

Podpis prawego panelu Rys. 17 (podobnie analogicznych rysunków dla kolejnych źródeł: Rys. 17, 30, 34, ...) jest błędny. Aby opis rysunku korespondował z obrazem, powinno być: ... *red shade space indicates the significance from the area OUTSIDE the source region* ... [por. opis do Rys. 10b z pracy Aharonian et al. (2006b)].

Nie umiem pogodzić wzorów 43 i 44 na str. 49 z odpowiednimi wartościami parametrów  $\Gamma$ ,  $N_0$ ,  $\Phi(E > 0.2 \text{ TeV})$  oraz  $\Gamma_{\text{int}}$  z danymi dla modelu M++ w Tabeli 4 na str. 57. Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku wartości liczbowych w Tabeli 10 (ale patrz niżej). Nasuwa się przypuszczenie, że wartość referencyjna  $E_0$  nie jest jednakowa dla różnych modeli widm.

Niepokój budzą wartości parametrów  $\sigma$ ,  $\sigma_a$  i  $\sigma_b$  w Tabeli 6 określające rozciągłość emisji 1ES 0414+009 w modelu kołowym i eliptycznym, gdyż obie wartości  $\sigma_a$  i  $\sigma_b$  są większe niż  $\sigma$ . Podobnie w Tabeli 33. Tabela 8 jest pod tym względem 'mieszana'. Wartości w Tabeli 6 wydają się 'nie pasować' do wartości w pierwszej od góry części Tabeli 8. Niepewności niektórych parametrów w Tabeli 14 bywają zaskakujące. Przykładowo: dla obserwacji z 2010 r. niepewność  $\sigma_b$  wynosi 0.0001°.

Przy wielu krytycznych uwagach dotyczących opracowania obserwacji Cen A, ważny wniosek merytoryczny jest dobrze uzasadniony. Brzmi on następująco: w energiach TeV obserwujemy emisję rozciąglą, którą można zdecydowania lepiej parametryzować rozkładem eliptycznym niż osiowosymetrycznym, a także, iż kąt pozycyjny wyróżnionego kierunku rozkładu emisji jest zgodny (w ramach niepewności pomiarów) ze strukturą Cen A w zakresie radiowym i rentgenowskim.

Kolejne paragrafy zawierają analizę obserwacji czterech blazarów. Cała czwórka była już wcześniej obserwowana przez H.E.S.S. i zarejestrowana jako źródła TeV. Znacznie dłuższe czasy ekspozycji nowych obserwacji pozwoliły Autorce na dokładniejsze wyznaczenie interesujących parametrów tych obiektów. Dla każdego ze źródeł wyznaczono położenie, nachylenie widma w trzech wariantach modelu potęgowego (czyste prawo potęgowe, rozkład ze zmiennym nachyleniem oraz widmo potęgowe z uwzględnieniem nieprzezroczystości zależnej od energii fotonów), górne ograniczenia na rozmiary, a także podano oceny rozmiarów przyjmując eliptyczny rozkład emisji. Przeprowadzona analiza i dyskusja nie budzi większych zastrzeżeń. Mam jednak dwie uwagi. Pierwsza dotyczy parametrów widm dwu obiektów: 1ES 0347-121 i 1ES 1101-232 w modelu M++. Oba źródła mają podobne redshifty (0.188 i 0.186), stąd również korekta nachylenia uwzględniająca nieprzezroczystość  $\gamma - \gamma$  jest dla nich podobna. Jednakże całkowity strumień powyżej 0.25 TeV widm poprawionych na ekstynkcję jest mniejszy od strumieni widm obserwowanych. Druga uwaga ma charakter bardziej formalny. Porównanie najlepszych dopa-

sowań 'parametrów kształtu' źródeł, to jest rozkładu osiowosymetrycznego z eliptycznym nie daje mocnych podstaw do stwierdzenia asymetrii rozkładu, z czym Autorka nie do końca się zgadza i w przypadku pierwszych trzech obiektów (w tym dwu wymienionych wyżej) stwierdza ... *extension visible in the VHE data*.

Pozostają sceptyczny wobec podanych wielkości w Tabeli 35. O ile w tym wypadku dla wszystkich obiektów są spełnione nierówności  $\sigma_b < \sigma < \sigma_a$ , to wartości liczbowe umieszczone po znaku  $\pm$  nie są niepewnościami określającymi dokładność wyznaczenia poszczególnych sigm. Niepokojąco małe są również niepewności kąta pozycyjnego  $\phi$  (kolumna 5.) dla wszystkich źródeł 1ES. Jeżeli niepewności sigm uznać za odchylenia standardowe, dla wszystkich źródeł z wyjątkiem PKS odejście od symetrii osiowej jest znaczące na poziomie wielu sigm.

Nie jestem pewien, na jakiej podstawie Autorka stwierdziła: *The majority of examined sources seem to be only slightly extended*. Mimo że opinia ta została wyrażona przy omawianiu Tabeli 35, przyjmuję, że nawiązuje do Tabeli 37 umieszczonej w następnym rozdziale. Aby uznać, że źródła są rozciągnięte należy porównać ich parametry morfologiczne z PSF. Rozumiem, że tą właśnie drogą uzyskano wartości zebrane w Tabeli 37. Jednocześnie byłbym bardzo ostrożny przy wyciąganiu jakichkolwiek wniosków z Tabeli 36 i Rys. 44. Zdaję sobie sprawę, że parametry  $\sigma_a$  i  $\sigma_b$  wyznaczone różnymi metodami mogą się znacznie różnić. Jednakże jeżeli mają cokolwiek mówić o obiekcie, którego dotyczą muszą być w odpowiednim zakresie zgodne. Tak nie jest. Na przykład: dla źródła 1ES 04415+009 stosunek  $\sigma_a/\sigma_b$  wynosi dla procedur ImPACT, M++ i uzyskany dzięki *Mathemacice* odpowiednio 2.36, 2.77 i 1.22. Pamiętając o zasadniczo różnych metodach uzyskania tych liczb, należy postawić pytanie, czy opisują tę samą własność obiektu. Uważam, że nie.

Nie jest dla mnie jasne, w jaki sposób zostały wykorzystane rozkłady pokazane na Rys. 45 (*model maps*). Paragraf 5.8 *Comparison of applied models* jest napisany na tyle hermetycznie i skrótowo, że trudno poddaje się ocenie. Podanie referencji do prac źródłowych niewiele pomaga, jeżeli referencja ta nie jest ogólnie dostępna. Przytoczenie definicji funkcji wiarygodności bez określenia, jak jest zdefiniowana wielkość RSS (*the residual sum of squares* to w omawianym przypadku zdecydowanie zbyt zdawkowa informacja). Jestem zaskoczony otrzymanymi przez Doktorantkę tak wysokimi wartościami statystyki  $F$ . Już wartość  $F = 20$  odpowiada poziomowi istotności  $\alpha \approx 10^{-8}$  (według internetowego 'kalkulatora' dla pierwszego stopnia swobody 2 i drugiego 200). Zatem dla  $F$  z zakresu  $\sim 70$  do  $\sim 450$  wielkości  $\alpha$  są znikome i według mnie w żaden sposób nie przystają do *significance maps* na ilustracjach zamieszczonych w pracy.

Dyskusja przeprowadzona w paragrafie 6.2 (*Discussion*) jest mało przekonująca z kilku powodów. Wartości  $\sigma_a$  i  $\sigma_b$  dla wszystkich czterech blazarów referencyjnych, a nie tylko jednego, zbyt mało różnią się między sobą, aby wyciągać wnioski z rozkładów kątów pozycyjnych. Niepewności wyznaczeń położenia źródeł VHE są na tyle duże, iż ewentualna systematyczna zależność  $D - z$  ma niewielką wiarygodność statystyczną. Podzielam opinie Autorki, iż rozkład punktów na Rys. 51 nie pozwala wysnuć znaczących wniosków na temat ewentualnych korelacji pomiędzy  $\sigma_a/\sigma_b$  i  $z$ .

Trzecia, końcowa część rozprawy nazwana *Appendices* zawiera rozdział A *Monte Carlo simulations*, który jest ważnym elementem rozprawy. Niestety opis przeprowadzonych symulacji nie pozwala mi wyrobić sobie opinii o jego przydatności dla prowadzonych analiz. Autorka stwierdza, że parametry rozkładu Gaussa  $\sigma_a$ ,  $\sigma_b$ ,  $\varphi$  i  $A$  zostały wylosowane z rozkładów jednorodnych. Pytanie: jaki sens ma parametr  $A$ ? (Pozostałe parametry zostały wcześniej zdefiniowane.). W sieci  $501 \times 501$ , jak rozumiem, pikseli wyznaczono wartości funkcji Gaussa, które następnie poddano przypadkowym fluktuacjom z jednorodnego zakresu  $(-A/5, A/10)$ , których zadaniem jest symulacja szumu tła. Tak 'zszumiony' rozkład Gaussa zostaje spleciony z PSF. Dla końcowego rozkładu można teraz wyznaczyć 'obserwowane' parametry:  $\sigma_a$ ,  $\sigma_b$  i kąt  $\varphi$ . Porównanie tych wartości z oryginalnie wprowadzonymi do symulacji pozwala ocenić wpływ tła i PSF na dokładność wyznaczenia parametrów fizycznych źródeł. Nie jestem pewien, czy powyższy opis poprawnie opisuje zastosowaną w pracy procedurę. Jeżeli tak, to nie pozwala ona na określenie faktycznych niepewności parametrów fizycznych źródła. Zważywszy, że typowa liczba zliczeń jest rzędu

kilkuset, głównym źródłem niepewności jest Poissonowska statystyka zliczeń pochodzących od źródła.

Całość rozprawy oceniam jako zadowalającą mimo licznych zastrzeżeń szczegółowych. Odnoszę bowiem wrażenie, iż większość z nich jest wynikiem pośpiechu, a nie braku wiedzy Doktorantki. Wydaje się, że Autorka nie poświęciła należytej uwagi dla skomentowania wartości poszczególnych wyników numerycznych. Jednocześnie jednak dwa główne wyniki pracy sformułowane w paragrafie 6.1 *Summary and conclusions* są w moim przekonaniu dobrze uzasadnione i wobec tego budzą zaufanie. Natomiast teza, iż trzy spośród czterech blazarów referencyjnych są rozciągle, ma niską wagę statystyczną. Autorka nie formułuje jednak tej tezy już tak stanowczo.

Wymieniając liczne niedociągnięcia pracy należy dla równowagi choćby wspomnieć o jej wاورach. Doktorantka wykazała się bardzo dobrą znajomością technicznych aspektów obserwacji promieniowania  $\gamma$  ultra wysokich energii. Specyfika detekcji  $\gamma$  poprzez rejestrację promieniowania Czerenkowa stawia przed młodym naukowcem wymagania, z którymi nie miał szans zetknąć się w czasie studiów magisterskich. Zatem elementem niezbędnym do przygotowania rozprawy doktorskiej jest zdobycie nowych umiejętności, w tym także sprawne korzystanie i modyfikowanie do własnych celów rozbudowanych programów komputerowych służących do obróbki danych. Doktorantka w tym zakresie wykazała się biegłością, a nawet pewną rutyną.

Na podkreślenie zasługuje strona techniczna i wizualna rozprawy, choć korekta techniczna w paru miejscach zawiodła.

Pytania szczegółowe:

Sądząc na podstawie ilustracji 13, odległości między obszarem źródła (*On Region*) a obszarami oceny tła (*Off regions*) w metodach *ring model* i *reflected-region* są podobne. Wobec tego, dlaczego drugiej metody nie można stosować dla źródeł rozciąglych.

Czy z faktu iż dwie statystyki użyte do oceny rozciąglyj emisji blazara 1ES 0414+009 dały odmienne wyniki, nie można wnioskować, że charakteryzują się one różnymi czułościami ze względu na określenie rozmiarów kątowych emisji?

Uwagi drobne:

str. 4: *The particle transfers part of its energy to a photon in an elastic process when the energy before interaction,  $\epsilon$ , is equal to the energy after interaction.* Uważam to sformułowanie za co najmniej niezręczne.

str. 14: Dla osoby nie zajmującej się badaniem struktur lawin cząstek inicjowanych przez CR (w tym  $\gamma$ ) opis jest stanowczo zbyt zwięzły.

str. 19: *M87 ... AGN closest to the Solar System*, a na str. 64 pierwsze miejsce zostaje przyznane Cen A.

str. 20: Obłoki odpowiedzialne za szerokie linie w widmach AGN poruszają się z prędkościami sięgającymi raczej 3000 km/s niż 300 km/s.

str. 20: Rozumiem, że  $F_{5GHz}$  i  $F_B$  są zdefiniowane jako  $\nu f_\nu$ .

str. 22: W definicji klasyfikacji Fanaroff-Riley zgubiono słowo określające wzajemną odległość jasnych składowych źródeł, np. *separation*.

str. 35: Nie rozumiem zdania: *The real direction to the source can be then estimated based on the  $\theta$  angle, which is offset between the reconstructed and the true direction.*

str. 64: Przeliczenie odległości 3.42 Mpc na (umowny) redshift jest błędne.

str. 71: '... X-ray FITS maps...' - jest to żargon, niestety często używany, który sugeruje, że wygląd mapy jest związany z formą zapisu FITS.

str. 72: Na rysunkach 26 i 27 mamy najwyraźniej do czynienia ze skalą kolorową, a nie odcieni szarości (*grey scale*).

str. 119: Chyba lapsus w definicji zakresu losowań parametru  $\sigma_b$ .

Szkoda, że na liście akronimów i skrótów nie znalazł się skrót p.e.  $\equiv$  *photo-electron*.

W podsumowaniu jest mi miło stwierdzić, że rozprawa pani Natalii Żywuckiej-Hejzner, mimo pewnych usterek, zawiera nowe i ciekawe wyniki dotyczące blazarów oraz spełnia ustawowe i

zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Z tego względu wnoszę o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie mgr Natalii Żywuckiej-Hejzner do jej publicznej obrony.

A. Hejzner