



Kraków, 08-03-2021

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Katarzyny Adamczyk
pt. "Optymalizacja metod analizy danych z teleskopów czerenkowskich CTA "

Rozprawa doktorska Pani Katarzyny Adamczyk opisuje pracę związaną z optymalizacją analizy danych wykorzystując symulacje Monte Carlo pęków atmosferycznych indukowanych przez fotony gamma. Wynikiem tej pracy jest opracowanie poprawki do metody analizy danych w warunkach zachmurzenia. Efektywny czas obserwacji z teleskopów Czerenkowa odgrywa ważną rolę w detekcji źródeł promieniowania gamma, szczególnie gdy spodziewany strumień jest słaby. Czas ten jest silnie ograniczony przez warunki atmosferyczne. Znaczna ekstynkcja światła Czerenkowa spowodowana obecnością chmur zmniejsza wykrywalność fotonów, a także komplikuje lub wręcz uniemożliwia właściwą analizę danych. Poprawka proponowana przez Autorkę pozwala odtworzyć widmo źródła promieniowania kosmicznego w przypadku obserwacji przeprowadzonych w warunkach zachmurzenia. W pracy Autorka pokazuje oczekiwane zmiany bilansu energetycznego, rozdzielczości energetycznej i kątowej oraz efektywnego obszaru zbierania spowodowane przez warstwy absorpcyjne znajdujące się na wysokości 5 i 7 km nad poziomem obserwacji. Autorka proponuje także metody korekcji tych wielkości (zrekonstruowanej energii i efektywnego obszaru zbierania). W rezultacie strumień fotonów od źródła, obserwowany podczas obecności chmur może być wyznaczony z błędem systematycznym mniejszym niż 20%. Zaproponowana metoda może być stosowana dla chmur na wysokościach większych niż 5 km n.p.m. Wysokości 5 km i 7 km odpowiadają średniej wysokości maksimum pęku indukowanego przez wysokoenergetyczny foton gamma o energii około 100 TeV i 10 TeV, pęki o takich energiach są zwykle rejestrowane przez teleskopy czerenkowskie o małej powierzchni luster rozmieszczone na powierzchni kilku kilometrów kwadratowych. Dzięki zaproponowanej poprawce analiza danych wykonanych w warunkach zachmurzenia, dla tego typu teleskopów, nie będzie wymagała dodatkowych czasochłonnych symulacji Monte Carlo.

Praca jest napisana w języku polskim. Składa się z dziewięciu rozdziałów, z krótkiego streszczenia, wstępu, zakończenia i bibliografii. Rozdziały 1, 2 i 3 stanowią wprowadzenie do tematu. Rozdział 4 opisuje symulacje Monte Carlo, a rozdziały 5, 6, 7 i 8 przedstawia wpływ chmur o różnej przezroczystości na gęstość fotonów czerenkowskich dla różnych konfiguracji teleskopów Czerenkowa. Główne wyniki pracy Autorki zostały przedstawione w rozdziałach 5-8, natomiast rozdział "Zakończenie" stanowi krótkie podsumowanie rozprawy. Treść rozdziałów 5-8 stanowiła również podstawę do publikacji, która ukazała się lipcu 2020 roku w prestiżowym czasopiśmie *Astroparticle Physics*. Wyniki były również prezentowane w kilku materiałach konferencyjnych (np. Gamma 2016, Heidelberg, Niemcy).

Rozprawa, wraz ze spisem literatury, schematami i tabelami, liczy 116 stron. Jest dobrze przygotowana od strony graficznej, ilustrowana licznymi wykresami (wiele z nich pochodzi z odpowiednich źródeł literaturowych) i można zauważyć, że praca została poddana starannej redakcji.



Opis pracy i główne wyniki

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

Rozdział 1 zawiera szczegółowy opis zjawiska promieniowania Czerenkowa. Opisano jego emisję w atmosferze w przypadku pęków atmosferycznych indukowanych przez fotony gamma, omówiono rozkłady poprzeczne gęstości fotonów na poziome detektora i rozkłady czasowe takie jak średnie czasy opóźnienia fotonów czerenkowskich w zależności od osi pędu. Następnie przedstawiono technikę pomiaru rozkładu kąтового światła Czerenkowa przez teleskopy naziemne tzw. technikę obrazowania Czerenkowa (Imaging Air Cherenkov Telescope-IACT), 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).

Rozdział 2 koncentruje się bardziej szczegółowo na zagadnieniu pochłaniania i rozpraszania światła przechodzącego przez atmosferę. W szczególności omówiono rozpraszanie na sferycznych cząstkach ośrodka, których rozmiary są mniejsze od długości fali padającej światła (tzw. rozpraszanie Rayleigha) i na cząstkach o dowolnych rozmiarach (tzw. rozpraszanie Miego). Opisano przekroje czynne na rozpraszanie, zdefiniowano pojęcie absorpcji, ekstynkcji i wprowadzono model chmury jako zbiór niewielkich kropeł o kulistym kształcie. Podano kluczowy wzór (dla tej pracy) na współczynnik ekstynkcji chmury wodnej (formuła 2.48), który był wielokrotnie użyty do generacji tabel ekstynkcji wykorzystanych w symulacjach Monte Carlo. Na zakończenie rozdziału wprowadzono model chmury lodowej składającej się z różnych wielkości kryształków lodu.

Rozdział 3 przedstawia opis nowej generacji teleskopów czerenkowskich jakim jest projekt Cherenkov Telescope Array (CTA). W rozdziale tym znajdziemy szczegółowy opis parametrów technicznych teleskopów wchodzących w skład przyszłego obserwatorium CTA. Są to teleskopy: LST-(L)arge-(S)ized Telescope), MST-(M)edium-(S)ized Telescope) i SST-(S)mall-(S)ized Telescope). Znajdują się tu również informacje o prototypowych wersjach małych teleskopów SST z jednym i dwoma lustrami powstałych w różnych ośrodkach naukowych, między innymi również w Polsce. Rozdział kończy się krótkim opisem struktury luster i kamery teleskopu czerenkowskiego.

Rozdział 4 opisuje metody Monte Carlo użyte do symulacji wielkich pęków atmosferycznych (program CORSIKA-COSmic Ray Simulation for KASCADE) i odpowiedzi obserwatorium CTA na pęki atmosferyczne (program sim_telarray i MARS-(MAGIC Analysis and Reconstruction Software)). Znajdujemy tu również opis parametrów wejściowych użytych w symulacjach programem CORSIKA, dowiadujemy się w jaki sposób modelowano chmurę. Zrobiono to poprzez modyfikacje tabel ekstynkcji w funkcji wysokości. W dalszej części rozdziału opisano parametry początkowe stosowane w programie sim_telarray, a następnie procedurę usuwania tła pochodzącego od elektroniki i nocnego nieba. Następnie przedstawiono procedury zaimplementowane w programie MARS w celu identyfikacji pęków indukowanych przez fotony tzn. metodę separacji gamma-hadron przy użyciu algorytmów o nazwie Random Forest i procedurę wyznaczanie energii pędu przy pomocy tzw. tabel LUT z ang. look-up-tables. Na zakończenie mamy przydatną Tabelę 4.2, która podsumowuje



parametry symulacji Monte Carlo użyte w programie CORSIKA oraz mapę układu teleskopów wykorzystanych w symulacjach.

Krótki rozdział 5 opisuje wpływ chmur na obserwowaną na poziomie detektora gęstość promieniowania Czerenkowa. Analizowano rozkłady poprzeczne gęstości fotonów Czerenkowa od pęków indukowanych przez fotony gamma. Rozważano wpływ chmury wodnej jak i lodowej o dwóch wartościach przezroczystości 0,4 i 0,7 oraz chmury całkowicie nieprzepuszczającej światła Czerenkowa. Do symulacji wybrano chmurę o niewielkiej grubości (100 m), dla której wykazano, że dla odległości większej niż 200 m od osi pęku osłabienie gęstości fotonów w warunkach zachmurzenia jest na poziomie od 2% do 6%.

W rozdziale 6 przedstawiono oryginalne wyniki symulacji w przypadku obecności hipotetycznej całkowicie nieprzezroczystej chmury i jej wpływ na istotne parametry rejestracji pęków fotonowych taki jak: efektywna powierzchnia detekcji, rozdzielczość kątowna i energetyczna. Rozważano wpływ takiej chmury na parametry separacji gamm-hadron (parametry Hillasa), położenie maksimum rozwoju pęku i rozkład θ^2 , parametru opisującego punktowość emisji źródła promieniowania gamma. Rozdział kończy konkluzja, że powyżej 4 TeV detekcja pęków jest co prawda możliwa, nawet przy obecności całkowicie nieprzezroczystej chmury, jednakże jak należy się spodziewać parametry rekonstrukcyjne wyznaczone przez sieć detektorów naziemnych (teleskopów) ulegają znacznemu pogorszeniu. Autorka zwraca uwagę, że w warunkach zachmurzenia, korekcja zebranych danych wymagałaby przeprowadzenia czasochłonnych symulacji Monte Carlo, albo zastosowania specjalnej metody analizy danych, która pozwoliłaby na odtworzenie widm źródeł kosmicznych obserwowanych w czasie zachmurzenia. Taka metoda zostanie zaproponowana przez Autorkę w następnym rozdziale.

Rozdział 7 przedstawia główne wyniki pracy. Opisano w nim typowe metody analizy danych w warunkach zachmurzenia, stosowane przez eksperymenty czerenkowskie i podano szczegóły metody proponowanej przez Autorkę w warunkach zachmurzenia. W rozdziale prezentowane są wyniki symulacji wykonane dla chmur o różnej przezroczystości (0,2 - 1) i różnych wysokościach: 5, 6, 7 km, dla detektora składającego się z pięciu teleskopów SST. Zbadano wpływ takiego zachmurzenia na parametry rekonstrukcji, parametry Hillasa, próg detekcji pęków fotonowych, na zrekonstruowaną energię pęku. W podrozdziale 7.4 zaproponowano korektę energii pęku w warunkach zachmurzenia (tzw. poprawka biasu), która została wyznaczona z symulacji dla pęków o energii w zakresie od 0.5 TeV do 100 TeV, (rysunki 7.10). Podano parametryzację opisaną wzorami 7.3 i 7.4, która pozwala na korekcję widma energii na podstawie znajomości parametrów chmury takich jak jej całkowita przezroczystość i wysokość. Proponowana parametryzacja biasu zależy również od stosunku liczby fotonów wyprodukowanych powyżej wysokości chmury i czynnika „A” powiązanego z geometrią układu teleskopów. W podrozdziale 7.5 opisano krok-po-kroku procedurę na korekcję widma obserwowanego źródła w warunkach zachmurzenia. Poprawność metody sprawdzono dla widma Kraba, obserwowanego w warunkach zachmurzonego oraz bezchmurnego nieba. Widmo Kraba odtworzono z dokładnością do 20% w stosunku do obserwacji dla bezchmurnego nieba, w przypadku warstwy chmur o przezroczystości większej lub równej 0,6 i na wysokości pomiędzy 5 a 7 km.

W rozdziale 8 Autorka testuje opracowaną metodę dla układu 2 teleskopów, stwierdzając, że metoda dobrze pracuje w przedziale energii od 2 TeV do 30 TeV, gdzie do testu użyto znów



widma Kraba. Dla niższych energii, poniżej 2 TeV rozdzielczość kątowna i energetyczna znacznie się pogarsza, spada częstość rekonstruowanych przypadków i efektywność rekonstrukcji określona poprzez cięcia stosowane do separacji gamma-hadron. Cięcia te ulegają zmianie w przypadku obecności zachmurzenia, powodując drastyczne zmniejszenie liczby zdarzeń uznawanych za pochodzące od pęków indukowanych przez fotony gamma. Rezultaty z tej części pracy potwierdzają wnioski uzyskane dla układu 5 teleskopów tzn. możliwość odtworzenia widma na poziomie 20% w przedziale energii 1-30 TeV dla chmury obecnej na wysokości pomiędzy 5 km a 7 km oraz przezroczystości między 0,6 a 0,7.

Pracę kończy krótki rozdział 9, opisujący główne wyniki badań.

Uwagi recenzenta:

Jak wspomniano powyżej, rozprawa została napisana w sposób dokładny i staranny, choć w kilku miejscach nie obyło się bez drobnych niedociągnięć. Rozmiar etykiet na niektórych rysunkach powinien być większy, gdyż czasami są one na granicy widoczności. Jako przykład można podać rysunek 7.9 ze strony 86 gdzie opisy do prezentowanych krzywych są nieczytelne, warto nadmienić, że jest to jeden z najważniejszych rysunków w pracy. Przeszkadza również występująca w różnych miejscach tekstu dwuspacjowa przerwa czy kropka kończąca zdanie, występująca przed jego właściwym zakończeniem (np. na stronie 36, 42, 43). Moim zdaniem w niektórych miejscach tekstu brakuje też odnośników do literatury np. przy definicji parametrów Hillasa na stronie 25, rozpraszaniu Rayleigh i Miego na stronie 23, co prawda te cytowania pojawiają się później, ale dobrze byłoby je zamieścić przy pierwszej dyskusji tych parametrów. Na stronie 53 pojawia się „Armazones”, a dopiero na stronie 59 dowiadujemy się, że jest to rozważana w przeszłości lokalizacja północnego detektora CTA. Jednak mimo tych drobnych potknięć pracę czyta się z przyjemnością, na uwagę zasługuje też dobre zbalansowanie pracy tzn. czytelnik dostaje konieczną informację w celu zrozumienia jej treści.

Jeżeli chodzi o aspekt naukowy to uważam, że praca jest cennym wkładem do analizy danych w warunkach zachmurzenia. Poniżej wymieniam tylko kilka drobnych uwag i niejasności, które nasunęły mi się po przeczytaniu pracy.

W rozdziale 4 omówione zostały dwa programy do symulacji odpowiedzi teleskopów czerenkowskich: `sim_telarray` i program MARS. Do symulacji odpowiedzi CTA użyłbym raczej pierwszego programu, skoro tytuł pracy sugeruje analizę danych dla teleskopów czerenkowskich CTA. Niezbyt jasny jest wybór programu MARS, stosowanego zwykle dla detektora MAGIC składającego się z dwóch teleskopów, zamiast programu `sim_telarray`, który według mojej wiedzy został specjalnie napisany do symulacji odpowiedzi detektora CTA, czyli układu wielu teleskopów o różnych parametrach.

Podstawą korekcji energetycznej w warunkach zachmurzenia jest formuła biasu 7.3 i 7.4, która wymaga dla pęku o danej energii (E) wyznaczenia średniej liczby fotonów czerenkowskich w funkcji głębokości atmosfery (H), tzw. funkcja $F_{ab}(E,H)$, prezentowana na rysunku 7.9. Jak to wspomniano w rozdziale 1 liczba fotonów czerenkowskich zależy od modelu atmosfery, a także pośrednio od modeli oddziaływań hadronowych użytych w symulacjach do opisu rozwoju wielkiego pęku. Nie znalazłem informacji jaki model atmosfery i jaki model oddziaływań hadronowych został użyty w symulacjach do



wyznaczenia funkcji F_{ab} . Istotniejszą kwestią jest odpowiedź na pytanie w jaki sposób funkcja F_{ab} ulega zmianie w zależności od modelu użytej atmosfery i modeli oddziaływań hadronowych tzn. jakie są błędy wyznaczania krzywych pokazanych na rysunku 7.9.

Innym istotnym parametrem występującym w formule na poprawkę energetyczną (formuła na bias 7.3) jest parametr „A”, który związany jest geometrią teleskopów i pełni rolę stałej normalizacyjnej. Brakuje mi w pracy informacji w jaki sposób ten parametr jest wyliczany dla danej geometrii układu teleskopów czerenkowskich.

O ile dobrze rozumiem, próg energetyczny detekcji, wprowadzony w podrozdziale 6.1.1., dla danego układu teleskopów czerenkowskich, jest w zasadzie iloczynem funkcji opisującej widmo energetyczne źródła i powierzchni efektywnej detekcji układu teleskopów. W tym kontekście, dla lepszego* zrozumienia tej wielkości przez czytelnika, można było ją zdefiniować explicite na początku rozdziału 6, wykorzystując widmo Kraba i formułę 6.1.

Na rysunku 6.3 pokazano gaussowskie fity do niegaussowskich rozkładów biasu. Moje pytanie brzmi: jakie kryterium było stosowane przy wyborze zakresu fitu Gaussa dla prezentowanych na tym rysunku rozkładów biasu.

Na rysunku 7.3 i 7.4 pokazano zmiany rozkładu parametru Hillasa, tzw. parametru length odpowiadającego połowie wielkiej osi elipsy opisującej rejestrowany obraz pęku na kamerze teleskopu, dla przypadku chmur o różnej przezroczystości. Dla chmur o większej przezroczystości maksimum tego rozkładu przesuwa się do większych wartości, wycinane są natomiast zdarzenia o mniejszej energii, z tym, że nawet w przypadku bezchmurnych obserwacji występują dwa piki koło 0.3 i 0.8 stopnia, (rysunek 7.3 lewy panel). Moje pytanie dotyczy pochodzenia tego drugiego piku, czy to są może obrazy generowane przez miony tzw. muon rings?

W rozdziale 5 symulowano chmurę o grubości 100 m, argumentując na stronie 63, że jest to optymalny wybór, a następnie w rozdziale 6 symulację wykonano dla chmury o grubości 500 m. Co było powodem tej zmiany. Sądzę, że wartościową rzeczą z punktu widzenia innych analiz byłoby zamieszczenie w pracy użytych profili ekstynkcji w funkcji wysokości (np. w dodatku do pracy). Pozwoliłoby to wykorzystać te profile w innych analizach, w których należałoby uwzględnić warunki zachmurzenia, dając tym samym możliwość użycia przykładowej parametryzacji modelu chmury.

Wszystkie obliczenia zostały wykonane przy użyciu parametrów ekstynkcji wyliczonych na podstawie wzorów: 2.48 i 2.54. Wartości te zostały wprowadzone do odpowiednich tabel ekstynkcji stosowanych przez program CORSIKA i sim_telarray. Czy istnieją dane eksperymentalne (satelitarne albo na podstawie pomiarów teledetekcyjnych) sprawdzające model chmury opisany równaniem 2.48 i 2.54?

Jak wspomniano w pracy, oczekiwany układ CTA North został w międzyczasie nieco zmodyfikowany. Czy byłoby możliwe przeprowadzenie jakiejś dyskusji na temat tego, jak ta (i inne możliwe przyszłe zmiany) wpływają na wnioski zawarte w tej pracy?

Na koniec interesuje mnie, jak metodę zaproponowaną przez Autorkę można rozszerzyć na przypadek chmur wielowarstwowych o zmiennej przezroczystości i zmiennych w czasie.



INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

Rezultaty prezentowane w pracy dotyczą sytuacji statycznych, a wyniki są prezentowane dla chmur o grubości 100 m i 500 m. Jednak warunki atmosferyczne i zachmurzenie w czasie obserwacji mogą się zmieniać dynamicznie. Cenna byłaby ocena procentowa, ile czasu zyskujemy stosując proponowaną przez Autorkę metodę korekcji danych warunkach zachmurzenia np. dla różnych teleskopów CTA.

Przedstawione powyżej uwagi nie umniejszają wartości pracy, która moim zdaniem wnosi nowy cenny wkład do analizy danych otrzymanych w warunkach zachmurzenia. Jak wspomniano na początku, każda metoda, która zwiększa czas obserwacji, jest cenna szczególnie w przypadku źródeł o małej intensywności promieniowania gamma, gdzie detekcja takich źródeł wymaga zwykle wielu godzin obserwacji. Warto podkreślić, że metoda zaproponowana przez Autorkę opiera się na informacjach łatwo dostępnych z pomiarów laserowych tzn. wymagana jest tylko znajomość wysokości i całkowitej przezroczystości chmury. Informacje te można uzyskać z danych z tzw. LIDARu. W pracy pokazano, że widmo źródeł mierzone w warunkach zachmurzenia może być wyznaczone z dokładnością do 20% dla teleskopów z progiem detekcji od 2 do 100 TeV i dla źródeł o widmie i intensywności Kraba. Niewątpliwie cenna zaletą proponowanej przez Autorkę analizy danych w warunkach zachmurzenia jest ograniczenie wykonania czasochłonnych resymulacji Monte Carlo, potrzebnych zwykle do identyfikacji fotonów gamma w warunkach zachmurzenia. Jednak moim zdaniem i tak pewne symulacje Monte Carlo są konieczne, chociaż w mniejszej skali, aby wyznaczyć współczynnik „A”, czy zweryfikować stosunek liczby fotonów w pęku (funkcja F_{ab}) dla rzeczywistej atmosfery i lokalizacji teleskopów czerenkowskich.

W mojej ocenie praca doktorska Pani **Katarzyny Adameczyk** spełnia wymogi formalne i zwyczajowe stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie Pani Katarzyny Adameczyk do dalszych etapów postępowania doktorskiego.

Dr hab. Dariusz Góra