

Kraków, 13.03.2019 r.

Dr hab. Piotr Homola, prof. IFJ PAN
Instytut Fizyki Jądrowej PAN
ul. Radzikowskiego 152
31-342 Kraków

**Recenzja rozprawy doktorskiej pana magistra Zbigniewa Plebaniaka pt.
„Badanie wpływu parametrów modeli oddziaływań wielkich energii na
rozwój WPA i możliwości pomiarowe eksperymentu JEM-EUSO”**

Rozprawa dotyczy modelowania wielkich pęków atmosferycznych (WPA) w kontekście badań w obszarze promieniowania kosmicznego skrajnie wysokich energii, tj. powyżej 10^{19} eV, i w perspektywie uruchomienia aparatury badawczej JEM-EUSO: obserwatorium, którego zadaniem będzie zebranie bezprecedensowej statystyki danych dt. promieniowania kosmicznego o najwyższych znanych energiach.

Zrozumienie mechanizmów fizycznych, dzięki którym w warunkach ziemskich możemy obserwować cząstki promieniowania kosmicznego o energiach przekraczających tzw. obcięcie GZK, tj. ok. 5×10^{19} eV, stanowi poważne wyzwanie naukowe już od ponad półwiecza, dokładniej od roku 1962, kiedy to po raz pierwszy zaobserwowano WPA o energii rzędu 10^{20} eV. Co to za cząstki? Skąd do nas przylatują? Jak to się dzieje, że udaje im się no nas dolecieć? Nie znamy odpowiedzi na te pytania. Sytuacji nie ułatwia naturalna trudność w zebraniu odpowiedniej statystyki danych – strumień promieniowania kosmicznego maleje bardzo gwałtownie z energią, mniej więcej jak $E \times 10^{-3}$, a powyżej obcięcia GZK ten spadek jest jeszcze szybszy. Przykładowo, w przypadku energii rzędu 10^{20} eV spodziewamy się mniej więcej jednej cząstki na kilometr kwadratowy w ciągu tysiąclecia. Oznacza to, że jakiegokolwiek obserwacje są możliwe jedynie pośrednio, poprzez analizę własności WPA rejestrowanych w obserwatoriach obejmujących bardzo duże powierzchnie. Największym z nich jest Obserwatorium Pierre Auger w Argentynie, obejmujące ok. 3000 km². Mimo tak dużej powierzchni liczba przypadków o energiach powyżej obcięcia GZK nie wystarcza do jednoznacznego określenia składu masowego strumienia promieniowania kosmicznego w tym zakresie energii, ani na wskazanie źródeł obserwowanych cząstek. Społeczność badaczy promieniowania kosmicznego najwyższych energii oczekuje, że przełomem technicznym umożliwiającym zebranie naukowo istotnej statystyki danych w zakresie energii powyżej obcięcia GZK będzie uruchomienie obserwatorium JEM-EUSO, gdzie WPA będą wykrywane nie z powierzchni ziemi, lecz sponad atmosfery, z wysokości ok. 400 km n.p.m, tj. z pokładu Międzynarodowej Stacji Kosmicznej. Dzięki wykorzystaniu zjawiska fluorescencji powietrza oraz zastosowaniu odpowiednich teleskopów należy oczekiwać, że obserwatorium JEM-EUSO zbierze statystycznie istotne dane o WPA inicjowanych przez cząstki o najwyższych znanych energiach i w ten sposób umożliwi postęp na drodze do zrozumienia procesów fizycznych związanych powstawaniem i propagacją tych cząstek.

Badania promieniowania kosmicznego o najwyższych znanych energiach są z natury obarczone niepewnościami, których nie należy lekceważyć zarówno przy planowaniu zadań badawczych jak i podczas interpretacji wyników. Do niepewności tych niewątpliwie należą wartości przekrojów czynnych na oddziaływania inicjujące WPA oraz zachodzące podczas rozwoju pęków w atmosferze. Przekroje te są kluczowymi parametrami w modelach

oddziaływań branych pod uwagę w ramach fizyki WPA. Co ważne: jeśli mówimy o energiach cząstek pierwotnych rzędu 10^{19} eV i wyższych, to należy mieć świadomość, że przekroje czynne dla tychże energii muszą być modelowane na podstawie dostępnych danych akceleratorowych i ekstrapolowane wiele rzędów wielkości do zakresów energii odpowiadających badanym cząstkom pochodzenia kosmicznego. Modelowanie i ekstrapolacja przekrojów czynnych dla oddziaływań w WPA nie jest zadaniem łatwym, oczywiście nie dysponujemy też „jedynie słusznym” modelem, ani nawet modelem najbardziej popularnym. W symulacjach WPA w zakresie wysokich energii najczęściej używa się obecnie modeli EPOS-LHC, QGSJETII.04 i Sibyll 2.3c dopasowując je do coraz świeższych danych z akceleratorów. Modele te różnią się między sobą na wiele sposobów, również jeśli chodzi o przekroje czynne na oddziaływania hadronów, co skutkuje różnicami w przewidywaniach dotyczących kluczowych parametrów WPA, takich jak np. głębokość atmosferyczna, na której WPA osiąga maksimum rozwoju, tzw. X_{max} , oraz fluktuacje tej głębokości obserwowalne w przypadku rejestracji większej liczby przypadków WPA. Zarówno X_{max} jak i fluktuacje X_{max} są wielkościami charakterystycznymi dla typu cząstki pierwotnej, zebranie odpowiedniej statystyki przypadków oraz porównanie obserwowanych rozkładów z przewidywaniami modeli pozwala na wnioskowanie o składzie masowym promieniowania. Oczekiwane i obserwowane fluktuacje X_{max} są na tyle duże, że posiłkując się dostępnymi obecnie technikami nie potrafimy jednoznacznie zidentyfikować cząstek pierwotnych inicjujących pojedyncze WPA, jednak zebranie odpowiedniej statystyki danych umożliwia wnioskowanie na podstawie rozkładów odpowiednich parametrów. Wyznaczenie składu masowego jest ważne dla rozwikłania kolejnych elementów zagadki promieni kosmicznych skrajnie wysokich energii, tj. dla poszukiwania odpowiedzi na pytania o źródła (produkcję) i propagację. A skoro tak, to każda praca w kierunku zredukowania niepewności modelowania oddziaływań cząstek o skrajnie wysokich energiach, czy też rozwijanie testowalnych modeli stanowiącym alternatywę dla tych najczęściej używanych, jawi się zadaniem bardzo potrzebnym, odpowiedzialnym i o dużym ciężarze gatunkowym. Takiego właśnie ambitnego zadania, stanowiącego przedmiot niniejszej rozprawy, podjął się p. mgr Zbigniew Plebaniak pracując pod kierunkiem prof. Tadeusza Wibiga.

Celem rozprawy było przedyskutowanie wpływu wybranych parametrów oddziaływań wysokich energii na rozwój WPA oraz wykazanie potencjalnej użyteczności wyników uzyskanych w przyszłości przez eksperyment JEM-EUSO do opisu oddziaływań promieniowania kosmicznego z atmosferą. Szczególną uwagę poświęcono nieelastycznemu przekrojowi czynnemu na oddziaływania jąder promieniowania kosmicznego z molekułami atmosfery ziemskiej. Omówiony został przygotowany w ramach pracy doktorskiej model optyczny rozpraszania jąder oparty na danych dotyczących elastycznych rozpraszania protonów w eksperymentach akceleratorowych. Model ten pozwolił na ekstrapolację jądrowych przekrojów czynnych do najwyższych energii promieniowania kosmicznego. Ekstrapolowane przekroje wykorzystano następnie w symulacjach WPA oraz do analizy składu masowego promieniowania kosmicznego w zakresie energii obejmowanym przez obserwatoria Telescope Array oraz Pierre Auger Observatory. Przeprowadzona analiza wskazała na różnice wynikające z zastosowania opracowanych w ramach rozprawy ekstrapolacji oraz przekrojów nieelastycznych, w porównaniu z metodami standardowymi. Różnice te ilustrują oryginalność pracy a ich skala wyznacza możliwe kierunki kontynuacji przeprowadzonych badań, zarówno w modelowaniu jak i obserwacyjnie.

Rozprawa liczy 126 stron i jest napisana w języku polskim. Układ jest klasyczny i logiczny. Rozdział pierwszy poświęcony został przedstawieniu i przedyskutowaniu stanu

wiedzy na temat promieniowania kosmicznego, z uwzględnieniem najwyższych obserwowanych energii. Przedyskutowano widmo energii promieniowania kosmicznego oraz zagadnienia związane ze składem, pochodzeniem oraz technikami detekcji. W rozdziale drugim omówiono zjawisko WPA i jego rolę w badaniach promieniowania kosmicznego, w tym kluczowe parametry pozwalające na rekonstrukcję własności cząstek pierwotnych, tj. inicjujących WPA. Rozdział trzeci został poświęcony projektowi JEM-EUSO. Opisano cele naukowe oraz parametry techniczne głównego przedsięwzięcia a także eksperymenty towarzyszące. W rozdziale czwartym przedyskutowano podstawowe zagadnienia dotyczące modelowania oddziaływań najwyższych energii. Omówiono najważniejsze parametry modeli produkcji cząstek przy energiach zderzeń osiąganych przez promienie kosmiczne, przedyskutowano trudności związane z modelowaniem tych parametrów oraz wskazano na kierunki rozwoju metodologii.

Najważniejszą część pracy stanowi rozdział piąty. Opisano w nim szczegółowo oryginalny model oddziaływań jąder o wielkich energiach pozwalający na ekstrapolację przekroju czynnego na oddziaływania proton-proton, proton-jądro i jądro-jądro do najwyższych energii. Dyskusja objęła wykazanie zgodności z danymi eksperymentalnymi oraz przedstawienie wyników ekstrapolacji przekrojów czynnych do najwyższych energii. W rozdziale szóstym opisano sposób zastosowania wymodelowanych ekstrapolacji przekrojów czynnych w symulacjach rozwoju WPA, przedstawiono wyniki tychże symulacji ilustrując je wartościami parametru X_{max} , tj. wielkości kluczowej w metodach wyznaczania składu masowego promieniowania kosmicznego, a także porównano uzyskane wyniki z rezultatami uzyskanymi metodami standardowymi. Na koniec przedyskutowano możliwe sposoby interpretacji uzyskanych wyników oraz różnic wynikających z porównania z rezultatami symulacji standardowych. Konkluzje rozprawy zawarte są w rozdziale siódmym, gdzie krótko przedyskutowano czułość teleskopu JEM-EUSO na testowanie modeli oddziaływań omawianych w rozprawie, oraz w rozdziale ósmym, w którym podsumowano całą rozprawę. Należy jeszcze dodać, że praca została wzbogacona przez cztery dodatki – ułatwiają one pełniejsze zrozumienie głównych treści.

P. mgr Zbigniew Plebaniak sprostał trudnemu zadaniu: cele naukowe jego rozprawy były ambitne a waga poruszonych zagadnień niemała. Zastosowana przez p. Plebaniaka metodologia jest poprawna, a efekt finalny stanowi oryginalny przyczynek do rozwoju badań w zakresie fizyki wysokich energii, co potwierdzone zostało artykułami (Ref. [46], której p. Plebaniak jest pierwszym autorem i Ref. [27] gdzie występuje jako współautor). Uzyskane wyniki zasługują na specjalną uwagę również w obliczu rozbieżności interpretacyjnej dotyczącej składu masowego promieniowania kosmicznego najwyższych energii wyznaczanego na podstawie danych zebranych przez czołowe obserwatoria: Pierre Auger Observatory i Telescope Array. W pierwszym przypadku mówi się o składzie mieszanym z tendencją do wzrostu masy wraz z energią, natomiast w drugim obcuje się przy składzie lekkim, tj. zdominowanym przez protony. Wyniki uzyskane przez p. Plebaniaka mogą w dalszej perspektywie czasowej, w tym również biorąc pod uwagę rosnącą statystykę danych, przyczynić się do uzgodnienia wzajemnie wykluczających się interpretacji, co miałoby bardzo duże znaczenie dla dalszych badań nad promieniowaniem kosmicznym skrajnie wysokich energii. W końcu nie bez znaczenia jest też kontekst pracy: p. mgr Plebaniak od 2014 jest członkiem międzynarodowej, renomowanej Współpracy JEM-EUSO, którego aktywność jest potwierdzona m.in. wystąpieniami konferencyjnymi w imieniu Współpracy (Ref. [27]). Rozprawa niniejsza nie jest więc na pewno pracą „do szuflady”, stanowi nie tylko ważny przyczynek w kluczowym projekcie badawczym astrofizyki cząstek, ale z uwagi na podjętą tematykę dotyczącą oddziaływań jąder o najwyższych znanych energiach jest również

uniwersalna fizycznie, co docenione zostało m.in. również grantem Etiuda z Narodowego Centrum Nauki.

Mimo pozytywnej oceny ogólnej należy jednak nadmienić, że rozprawa nie jest pozbawiona pewnego rodzaju braków czy niedomówień merytorycznych w miejscach, które być może są w pełni jasne dla Autora, lecz nie są jednak łatwo zrozumiałe dla czytelnika nie zajmującego się na co dzień modelowaniem oddziaływań wysokoenergetycznych cząstek. Poniżej zamieszczam zatem listę uwag merytorycznych, które mimo iż nie rzutują na ogólną ocenę pracy, mogą przydać się p. Plebaniakowi w wypadku gdyby zechciał doskonalić swój warsztat naukowy w zakresie sposobów przekazywania wiedzy – rzecz ważna na dalszych etapach kariery naukowej.

Uwagi merytoryczne:

- str. 55: „Podejście Glaubera jest najbardziej powszechnie używaną teorią służącą do opisu przekrojów czynnych w zderzeniach jądrowych.” – autorzy dwóch z trzech standardowych modeli opisujących oddziaływanie cząstek wysokich energii w WPA nie cytują w ogóle prac Glaubera, pozostali cytują pracę nowszą o ponad dekadę niż praca wykorzystana przez autora rozprawy; w tym miejscu przydałaby się bardziej wyczerpująca dyskusja i wyjaśnienia;

- str. 59: uwaga „zastosowany opis jest poprawny” odnosi się do zbieżności uzyskanych przekrojów czynnych z używanymi dotychczas, co utrudnia zrozumienie oryginalności pracy, przy tym rysunki 5.10 i 5.11 pokazują raczej różnice niż zbieżność;

- str. 66: „zaistniała potrzeba zmodyfikowania przekrojów p-K i p-Pi” – tutaj brakuje dyskusji upewniającej czytelnika, że zastosowana przez Autora modyfikacja „proporcjonalna” jest uzasadniona; biorąc pod uwagę stopień komplikacji modeli wykorzystywanych w symulacjach WPA należy z ostrożnością podchodzić do z pozoru „prostych” manipulacji w kodzie źródłowym;

- str. 66: załączenie, być może w kolejnym dodatku, informacji o parametrach symulacji wykonanych przy użyciu programu CORSIKA podniosłoby wartość pracy umożliwiając ewentualne powtórzenie i/lub weryfikację wyników uzyskanych przez Autora;

- Rozdział 6.2: udostępnienie w jakikolwiek sposób kodu źródłowego wykorzystanych modeli wraz z wprowadzonymi zmianami umożliwiłoby ewentualną weryfikację uzyskanych wyników przez innych badaczy. Możliwość takiej weryfikacji jest zawsze bardzo cenna gdy mamy do czynienia z programem realizującym unikalne zadanie, bez punktu odniesienia w już istniejących pracach, a tak jest właśnie w tym przypadku. Brak dostępu do zmodyfikowanego kodu znacznie ogranicza też możliwy pozytywny wpływ rozprawy na postępy prac badawczych dotyczących WPA;

- str. 67 i 68: mimo, iż Autor nie jest optymistą co do możliwości testowania modeli oddziaływań jądrowych przez JEM-EUSO z uwagi na zbyt niską rozdzielczość w X_{max} (ok. 80 g/cm², podczas gdy typowe różnice w X_{max} między modelami to ok. 20 g/cm²), należałoby jednak wskazać na potencjalną możliwość weryfikowania trendu $\sigma(X_{max})$. Rysunki 6.3 i 6.5 pokazują, że w modelach z przekrojami czynnymi wyznaczonymi przez Autora trend $\sigma(X_{max})$ jest nieco inny (rosnący) niż w przypadku modeli ze standardowymi przekrojami. Ta różnica wydaje się bardzo interesująca i warta pogłębionej

analizy. Niewykluczone, że statystyka danych zebranych przez JEM-EUSO wystarczy do weryfikacji trendów $\sigma(X_{max})$, co oznaczałoby niezwykle istotne, nowe informacje o procesach fizycznych zachodzących przy najwyższych znanych energiach.

Pan mgr Zbigniew Plebaniak nie ustrzegł się także prostych błędów językowych i stylistycznych, które nie mają wpływu na jakość merytoryczną pracy, jednak utrudniają czytanie i rozumienie rozprawy. Poniżej zamieszczam listę wybranych niedociągnięć tego rodzaju – niech będzie ona pozytywną zachętą dla p. Plebaniaka do pracy nad wzbogaceniem warsztatu naukowego również w zakresie dbałości o szczegóły edycyjne manuskryptów.

Lista wybranych drobnych niedociągnięć językowych i edycyjnych znalezionych w zasadniczej części rozprawy, bez wpływu na jej wartość merytoryczną:

- Streszczenie: „ ... kosmicznego [z] jądrami atmosfery ... ” → brakuje [z]; zamiast „jądrami” bardziej odpowiednie byłoby np. „molekułami”.
- str. 50, Rysunek 5.9: brak wyjaśnienia w opisie osi Y o jaki przekrój czynny chodzi, wprawdzie dowiadujemy się tego z tekstu, jednak dobra praktyka tworzenia rysunków wymaga by były one zrozumiałe niezależnie od towarzyszącego tekstu, gdzie na ogół można znaleźć szczegółową dyskusję. Przykładem na znajomość tej dobrej praktyki przez Autora mogą być kolejne rysunki: 5.10 i 5.11.
- str. 58: „Nie należy więc przykładać szczególnej wagi do dużego rozrzutu pomiędzy różnymi punktami.”, dotyczy punktów pomiarowych z różnych eksperymentów na rys. 5.10 → uwaga mało precyzyjna – rozrzut między punktami pomiarowymi w różnych eksperymentach naukowych wskazujący na brak zgodności w obrębie deklarowanych niepewności pomiarowych to ważna informacja, może wskazywać na niedoskonałości metodologiczne lub na niebrane pod uwagę zjawiska fizyczne.
- str. 59, Rysunek 5.11: nie widać przybliżenia punktowych nukleonów, według opisu powinny to być czerwone kropki, jeśli są „przykryte” czarnymi to należało zrobić komentarz.
- str. 60, Tabela 5.2: „Energy” → praca pisana jest w języku polskim.
- str. 60, Tabela 5.2: Trudno zrozumieć tę tabelę, brakuje do niej odnośnika w tekście prace, czytelnik musi zgadywać o jaki całkowity przekrój czynny chodzi, dopiero z dzięki publikacji Autora można się upewnić, że chodzi o przekrój na oddziaływania p-p.
- str. 61, Tabela 5.3: „funkcja eksponent” → nieprawidłowa nazwa funkcji.
- str. 63: „Rozkład podłużny pędu, ..., jest jednym z najważniejszych parametrów...” → użyte określenie jest nieprecyzyjne, rozkład nie jest parametrem, rozkład może mieć parametry, tzn. może być sparametryzowany.
- str. 70: „poprostu” → ortografia.
- str. 72: „przedstawione wyniki nie są optymistyczne” → niepotrzebne wartościowanie – w nauce każdy dobrze opracowany wynik jest optymistyczny, jest krokiem naprzód nawet jeśli zamyka potencjalnie atrakcyjne ścieżki badawcze.
- str. 75: „Opierając się na danych eksperymentalnych ... dopasowano rozkłady oddziałującej części 'materii hadronowej'.” → niezadowolająca jasność – czytelnik musi się domyślać o jakie rozkłady chodzi co dopasowano do czego.
- str. 76: „wnioskiem ... jest fakt” → wadliwa logika i precyzja języka – wniosek może być wyprowadzony z jakiegoś faktu, tzn. z zaistniałego stanu rzeczy, ale zaistniały stan rzeczy, czy też fakt w potocznym rozumieniu, tj. wydarzenie, które miało miejsce

w określonym miejscu i czasie nie może być sam w sobie wnioskiem, czyli tym, za co w logice uważa się twierdzenie wyprowadzone ze zdań uznanych za prawdziwe.

- Bibliografia: „[20] ... Piotrowski, and On Behalf...” → niepotrzebne „and”
- Bibliografia: niejednorodny format wpisów np. „Caps Lock” w nazwiskach w [29], [31], [82].
- Bibliografia: w pozycji [127] „pierre auger observatory” → powinno być „Pierre Auger Observatory”.
- Bibliografia: pozycja [138] → brak informacji o uczelni i promotorze praktycznie uniemożliwia dotarcie do tej pozycji.

Podsumowując stwierdzam, że przedstawiona praca spełnia wszystkie ustawowe i zwyczajowe kryteria stawiane rozprawom doktorskim. W związku z tym, z pełnym przekonaniem, wnoszę o dopuszczenie pana magistra Zbigniewa Plebaniaka do dalszych etapów przewodu doktorskiego i wnoszę o wyróżnienie jego rozprawy.

