



dr hab. Andrzej Rybicki  
Instytut Fizyki Jądrowej im. H. Niewodniczańskiego PAN  
ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków

Kraków, 15 marca 2022 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr Narendry Rathoda pt. „Study of  $e^+e^-$  production in  $\pi^-p$  collisions in HADES at GSI”**

Rozprawa doktorska Pana mgr Narendry Rathoda zawiera wyniki badań produkcji dileptonów  $e^+e^-$  w zderzeniach ujemnie naładowanych mezonów  $\pi$  z tarczą polietylenową przy pędzie wiązki równym 0.685 GeV/c. Centralnym zagadnieniem pracy jest wyodrębnienie, a następnie zbadanie charakterystyk zjawiska promieniowania hamowania (brehmstrahlung) z emisją wirtualnego fotonu:  $\pi^-p \rightarrow \pi^-p\gamma^* (\gamma^* \rightarrow e^+e^-)$ . Analizowane dane eksperymentalne pochodzą z detektora HADES na akceleratorze SIS-18 w GSI. W celu wyodrębnienia z nich sygnału od zderzeń pion-proton praca obejmuje równoległą analizę danych ze zderzeń mezonów  $\pi$  z tarczą węglową ( $\pi^-C$ ) przy tej samej pędzie wiązki i w tym samym układzie eksperymentalnym. Uzyskane wyniki doświadczalne (a więc rozkłady masy brakującej, masy niezmienniczej, rozkłady kątowe, rozkłady pędu poprzecznego i pospieszności emitowanych cząstek) zostają szczegółowo porównane z wynikami rachunków modelowych (symulacji Monte Carlo), co pozwala na wyodrębnienie udziału zjawiska brehmstrahlung spośród innych przyczynków stanowiących tło do obserwowanych procesów, w tym przede wszystkim zjawiska rozpadu Dalitza mezonu  $\pi^0$ . Ostatecznym wynikiem pracy jest zestaw przekrojów czynnych na proces promieniowania hamowania z emisją wirtualnego fotonu w trzech kanałach ekskluzywnych, odpowiednio:  $\pi^-pe^+e^-$ ,  $\pi^-e^+e^-X$ ,  $pe^+e^-X$  w obszarze masy niezmienniczej dileptonów  $e^+e^-$  powyżej 0.14 GeV/ $c^2$  i w akceptancji detektora HADES, a także w kanale inkluzywnym  $e^+e^-X$  z dodatkowym warunkiem na masę brakującą powyżej 1.2 GeV/ $c^2$ . Po ekstrapolacji do pełnej przestrzeni fazowej i pełnego zakresu masy niezmienniczej uzyskane przekroje czynne okazują się konsistentne w ramach uzyskanych, znaczących niepewności. Jest to pierwszy zestaw przekrojów czynnych na ten proces w zderzeniach elektrycznie naładowanego pionu z protonem.

Ogólny układ rozprawy doktorskiej jest kompletny i dobrze przemyślany. W kolejnych rozdziałach autor przedstawia motywację fizyczną badania produkcji dileptonów w reakcjach jąder atomowych i zderzeniach hadronów, wraz z podstawami stosowanego opisu teoretycznego zjawiska brehmstrahlung w ramach przybliżenia miękkich fotonów (rozd. 1), przedstawia i wyjaśnia funkcjonowanie systemu detekcyjnego HADES w GSI (2), opisuje istotne dla swojej analizy procedury rekonstrukcji i identyfikacji produktów zderzenia (3), objaśnia założenia opracowanych na jej użytek symulacji modelowych wraz z bardzo istotną kwestią różnic pomiędzy zderzeniami pion-proton i pion-węgiel (4), przedstawia szczegóły analizy eksperymentalnej wraz z pierwszą częścią uzyskanych wyników, a więc rozkładami masy brakującej oraz masy niezmienniczej dileptonów  $e^+e^-$  w trzech badanych kanałach ekskluzywnych i w kanale inkluzywnym (5). Centralny, szósty rozdział rozprawy (*data versus simulations*) stanowi wartościowy przykład skutecznego połączenia analizy eksperymentalnej i fenomenologicznej, w której przygotowane uprzednio rachunki modelowe pozwalają na uzyskanie zrozumiałego opisu szerokiego zestawu wyników eksperymentalnych, wyodrębnienie obszarów badanych obserwabli pozwalających na określenie przyczynku od promieniowania hamowania, wreszcie na oszacowanie i stosowną ekstrapolację przekrojów czynnych na ten proces w kolejnych badanych kanałach ekskluzywnych i w kanale inkluzywnym. Lektura tego rozdziału jednoznacznie przekonuje że autor bardzo dobrze się orientuje w obu (eksperymentalnym i teoretycznym) aspektach prowadzonej analizy; w tym punkcie rozprawa znacznie przekracza zwyczajowe minimum wymagane od prac eksperymentalnych w fizyce wysokich energii, którym jest stosowanie symulacji modelowych do poprawek na efekty detektorowe. Zwięzłe, prawie wyłącznie opisowe podsumowanie (rozd. 7), oraz krótki dodatek poświęcony algebraicznym przekształceniom wzoru na potrójnie różniczkowy przekrój czynny na produkcję dileptonów w przybliżeniu miękkich fotonów kończą pracę.

Nie ulega wątpliwości że zaprezentowana w rozprawie Pana Rathoda analiza jest oryginalna a uzyskane wyniki poznawczo wartościowe. Zarówno uwarunkowania detektorowe, jak ograniczenia wynikające ze skończonej statystyki są dobrze zrozumiane i skutkują dobrze zdefiniowanymi niepewnościami pomiarowymi. Poza pierwszym na świecie zestawem przekrojów czynnych na proces  $\pi^-p \rightarrow \pi^-p\gamma^* (\gamma^* \rightarrow e^+e^-)$





i wnikliwym zrozumieniem przyczynków stanowiących tło do tego procesu, cennym produktem pracy wydaje się negatywna weryfikacja przewidywań modelowych opartych na przybliżeniu miękkich fotonów. Uzyskane przez autora wyniki pozwalają na stwierdzenie że przybliżenie to przeszacowuje wkład procesu brehmstrahlung mniej więcej czterokrotnie, co autor dyskutuje w kontekście istniejących w literaturze oszacowań teoretycznych. Nieco dziwi że wspomniana kwestia nie została odnotowana w podsumowaniu w rozdziale 7.

O ile merytoryczna i poznawcza wartość pracy nie budzą żadnych wątpliwości, o tyle jej klarowność w oczach czytelnika niezwiązanego ze współpracą HADES i związany z nią aspekt edukacyjny rozprawy pozostają miejscami ograniczone. Zdaniem recenzenta fakt ten jest przede wszystkim konsekwencją trudnego kompromisu pomiędzy koniecznością dokładnej dokumentacji przeprowadzonej wielostopniowej analizy (w praktyce zapewne również na użytek współpracy) a bardzo uzasadnionym dążeniem do zachowania rozsądnej objętości samej rozprawy (praca wraz z dodatkiem i spisem literatury liczy 128 stron). Niemniej, biorąc pod uwagę ogólnie wysoką wartość edukacyjną tej pionierskiej analizy wskazanym wydaje się wymienienie kilku przykładów, dla których klarowność czy też kompletność jej opisu budzi zastrzeżenia.

Biorąc pod uwagę jak istotną, nawet jeśli poznawczo interesującą, komplikacją w całej analizie jest konieczność uwzględnienia wkładu od reakcji  $\pi^+C$ , we wstępnych rozdziałach pracy (np. rozdziale 2) recenzentowi brakuje wzmianki dlaczego w procesie uzyskiwania danych eksperymentalnych nie zastosowano tarczy ciekłowodnorodowej zamiast polietylenowej. Zagadnienie to jest tylko krótko zaadresowane w ostatnim akapicie pracy i wyłącznie w kontekście ewentualnych przyszłych pomiarów.

W rozdziale 4, zastosowana na rys. 4.1 do opisu symulacji procesu brehmstrahlung trójwymiarowa wizualizacja potrójnie różniczkowego przekroju czynnego na produkcję par dileptonów jest dla postronnego czytelnika bardzo trudna do zrozumienia. Sytuację poprawia oczywiście dołączona jednowymiarowa projekcja na oś masy niezmienniczej dileptonów  $e^+e^-$ . Jest oczywiste że wizualizacja tego rodzaju funkcji jest sama w sobie bardzo trudna, lecz wydaje się że zastąpienie obecnej wersji kilkoma jedno- lub dwu-wymiarowymi projekcjami znacznie ułatwiłoby życie czytelnikowi.

Również w rozdziale 4, sekcja 4.3.2 opisująca stosowane w symulacjach skalowanie procesu brehmstrahlung pomiędzy zderzeniami  $\pi^+p$  oraz  $\pi^+C$  szczegółowo wymienia stosowane założenia, lecz w bardzo niewielkim stopniu wyjaśnia ich logikę, zapewne oczywistą dla eksperta którym jest autor rozprawy. W szczególności, relacja 4.3.8 opisująca stosunek obu przekrojów czynnych staje się dla nie-eksperta zrozumiała dopiero po przeczytaniu późniejszej sekcji 4.4. Z kolei wspomniana sekcja 4.4 zawiera krótką lecz istotną wzmiankę, że efekty detektorowe (akceptancja i wydajność) dla wszystkich procesów tła dla reakcji  $\pi^+C$  są przyjęte jako identyczne do reakcji  $\pi^+p$  z pominięciem efektów jądrowych takich jak pęd Fermiego. Biorąc pod uwagę że wpływ wspomnianego pędu Fermiego jest dyskutowany wcześniej (sekcja 4.3.1) i dla dyspersji energii w środku masy zderzenia nie wydaje się zaniedbywalny, fakt ten budzi pewien niepokój. Krótka wzmianka na temat ewentualnych niepewności wynikających z przyjęcia wspomnianego założenia, lub choćby jakieś bardzo wstępne oszacowanie, stanowiłyby cenne uzupełnienie tej sekcji.

W rozdziale 5, w sekcji 5.6.2 opisującej cięcia eksperymentalne mające na celu eliminację tła od konwersji fotonów w tarczy i w detektorze RICH, trudna do zrozumienia jest logika zastosowania najpierw cięcia na kąt otwarcia (opening angle) pomiędzy kandydatem leptonowym a śladem określanym jako sąsiadujący na  $4^\circ$ , a następującym po nim dodatkowym cięciem na kąt otwarcia pomiędzy dwoma w pełni zrekonstruowanymi śladami leptonowymi, którego wartość autor ustawia na  $9^\circ$ . Niedoświadczony czytelnik może z opisu wnioskować że pierwsze z tych dwóch cięć jest zbędne biorąc pod uwagę obecność drugiego.

W rozdziale 6, w sekcji 6.3.1, dyskusja rysunku nr 6.7 przedstawiającego rozkład kwadratu masy brakującej układu ( $\pi^-p e^+ e^-$ ) i wyniki odpowiednich rachunków modelowych wprowadza pewne „zamieszanie terminologiczne”. Rysunek przedstawia dane doświadczalne z tarczy polietylenowej, które autor określa jednak jako „ $\pi^-p$ —Data”. Czyni to aby podkreślić oczywisty dla siebie fakt że udział zderzeń  $\pi^+C$  jest dla dyskutowanego rozkładu bardzo niewielki. Tę intencję autora trudno jest odgadnąć bez pomocy. Dla tego





**INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ  
im. Henryka Niewodniczańskiego  
POLSKIEJ AKADEMII NAUK**

samego rysunku brakuje wzmianki że modelowany przyczynek od promieniowania hamowania musiał zostać czterokrotnie zmniejszony aby opisać dane doświadczalne; tej samej wzmianki brakuje też w sekcji 6.5 dla kanału  $pe^+e^-$ . W połączeniu ze wspomnianym już brakiem odnotowania kwestii negatywnej weryfikacji przybliżenia miękkich fotonów w podsumowaniu pracy (rozd. 7) powoduje to, że dla mniej uważnego czytelnika ta ważna kwestia staje się mniej oczywista niż zapewne było intencją autora.

Te i inne przykłady niedoskonałości opisu przeprowadzonej przez Doktoranta pionierskiej analizy eksperymentalnej i fenomenologicznej w żadnym razie nie podważają jej merytorycznej wartości, a tylko w bardzo niewielkim stopniu ograniczają jej i tak wysoką wartość edukacyjną. Ogólnie praca jest napisana dobrze zrozumiałym angielskim, a drobne niedociągnięcia językowe nie są warte wzmianki.

Dlatego podsumowując, uważam że rozprawa doktorska Pana mgr Narendry Rathoda zatytułowana „Study of  $e^+e^-$  production in  $\pi^-p$  collisions in HADES at GSI” zawiera nowe, ciekawe i ważne wyniki dotyczące produkcji dileptonów  $e^+e^-$  w zderzeniach naładowanych pionów z protonami przy energiach akceleratora SIS-18. Autor wykazał się dogłębną znajomością tematyki fizycznej i wysokim poziomem wiedzy o różnych aspektach analizy doświadczalnej, oraz dużą biegłością w łączeniu jej z analizą fenomenologiczną. Zawarte w niniejszej recenzji uwagi krytyczne w najmniejszym stopniu nie umniejszają poznawczej wartości rozprawy.

**Recenzowana rozprawa doktorska spełnia zwyczajowe i ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie Pana mgr Narendry Rathoda do dalszych etapów postępowania doktorskiego.**

*A. Pyfiedli*