



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

Kraków, 24 stycznia 2018 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej pana mgr Leszka Kosarzewskiego pt. „Study of quarkonium production in relativistic proton-proton collisions in the STAR experiment”

Rozprawa doktorska pana mgr Leszka Kosarzewskiego zawiera wyniki badań produkcji mezonów przyjmujących ogólną nazwę kwarkonium: $\Upsilon(bb)$ oraz $J/\psi(cc)$ w zderzeniach proton-proton przy energiach akceleratora RHIC w Brookhaven National Laboratory. Dane pochodzą z eksperymentu STAR. Oba mezony badane są przez ich rozpady w kanale dielektronowym, odpowiednio $\Upsilon \rightarrow e^+e^-$ i $J/\psi \rightarrow e^+e^-$. Część opisanych w rozprawie wyników została opublikowana w recenzowanym czasopiśmie Physical Review C, pozostałe były prezentowane jako oficjalne wstępne dane współpracy STAR. Zaprezentowane w rozprawie zbadanie produkcji mezonu Υ w funkcji pędu poprzecznego jest pierwszym tego typu pomiarem przy energiach RHIC.

Badania prowadzone w rozprawie są cennym przyczynkiem do całokształtu naszej wiedzy o oddziaływaniach silnych. Pozwalają na weryfikację istniejących modeli, łączących w sobie elementy perturbacyjne i nieperturbacyjne. Dostarczają informacji o oddziaływaniu kwarkonium z hadronami. Mogą też rzucić nowe światło na kwestię obecności zjawisk kolektywnych w zderzeniach proton-proton, co stanowi jedno z centralnych zagadnień współczesnej ultrarelatywistycznej fizyki jądrowej.

Rozprawa składa się z ośmiu rozdziałów, uzupełnionych sześcioma dodatkami.

Rozdziały I i II stanowią wprowadzenie do tematyki produkcji kwarkonium w wysokoenergetycznych zderzeniach hadronowych i jądrowych. Rozdział I omawia zagadnienia ogólne, takie jak fizyka wysokich energii, chromodynamika kwantowa, fizyka zderzeń proton-proton oraz stanów Υ i J/ψ . Rozdział II opisuje modele produkcji tych stanów oraz wybrane rezultaty eksperymentalne.

Trzon rozprawy stanowi jej część doświadczalna, której autor poświęca łącznie cztery rozdziały. Po bardzo zwięzłym, krótkim zdefiniowaniu szczegółowych celów pracy (rozdział III) opisany zostaje eksperyment STAR. Mimo że w znacznym stopniu oparty na istniejących pracach, opis zawarty w rozdziale IV jest klarowny. Czytelnik uzyskuje spójną wiedzę o współzależnościach pomiędzy kolejnymi detektorami i procedurami eksperymentalnymi, których efektem są dane analizowane w rozprawie. Nie do końca celowe wydaje się osobne wyszczególnienie osobistego wkładu autora w proces zbierania danych oraz techniczne i software'owe aspekty eksperymentu, co stanowi raczej podstawę do kolejnego dodatku.

Niezmiernie pouczający jest V rozdział rozprawy, szczegółowo opisujący analizę produkcji Υ w zderzeniach proton-proton przy energii 500 GeV. Autor posiada bardzo rzetelną wiedzę na temat wielostopniowego procesu ekstrakcji krotności produkowanych mezonów Υ w funkcji ich pospieszności i pędu poprzecznego, na podstawie danych eksperymentalnych uzyskanych w oparciu o określony, nie-inkluzywny układ wyzwalający. Analiza jest złożona, lecz przedstawiona w sposób jasny i logiczny. Jej elementy składowe, jak np. odpowiedni dobór zarejestrowanych przypadków i obserwowanych w nich cząstek, identyfikacja elektronów i pozytonów, a następnie badanie widm ich masy niezmienniczej z uwzględnieniem efektu układu wyzwalającego na tło kombinatoryczne i skorelowane, wydają się dobrze przemyślane i zoptymalizowane. Czytelnik uzyskuje bezpośredni wgląd w analizowane widma, co okaże się przydatne w czytaniu dalszej części pracy. Na uznanie zasługuje rygor narzucony w opisie licznych poprawek na zastosowane procedury i efekty detektorowe. Skutkują one obecnością nie mniej niż szesnastu źródeł systematycznych niepewności pomiarowych. Ich klarowny opis oraz kompilacja całkowitych skorelowanych i nieskorelowanych błędów systematycznych są niewątpliwie mocną stroną rozprawy.

Wobec bardzo rzetelnego podejścia autora do całej analizy pewien niedosyt budzi potraktowanie nielicznych zagadnień szczegółowych. W sekcji 5.6.5 opisywane jest udoskonalenie kształtu widma rozpadu $\Upsilon \rightarrow e^+e^-$ poprzez uwzględnienie dodatkowego rozmycia rekonstruowanego wektora pędu, co



zrobione jest na podstawie rozkładów uzyskanych dla mezonu J/ψ . Brakuje komentarza autora czy wynikająca z symulacji i badań detektorowych zdolność rozdzielcza eksperymentu STAR rzeczywiście wymaga uwzględnienia takiego brakującego przyczynku. Zapewne porównanie widm pochodzących z osadzania (ang. embedding) cząstek Υ z danymi eksperymentalnymi dostarczyłoby dodatkowego dowodu, że procedura nie jest stosowana *ad hoc*. W sekcji 5.7.7 dwu-zdaniowy opis szacowania niepewności związanej z wydajnością układu wyzwalającego jest zbyt ogólny, biorąc pod uwagę że dyskutowane tutaj źródło daje największy przyczynku do błędu systematycznego.

Nieco mniej szczegółowy jest rozdział VI, opisujący badanie produkcji J/ψ w zderzeniach proton-proton przy energii 200 GeV. Jest to uzasadnione biorąc pod uwagę częściowe podobieństwo do opisanej wcześniej analizy produkcji Υ , po części też przez fakt wcześniejszej publikacji uzyskanych wyników. Paradoksalnie jedyną wartą wzmianki wątpliwość budzi tu niewymienione w poprzednim rozdziale szacowanie błędu systematycznego związanego z poprawką na szerokość przedziału. Niepewność ta ma sięgać od -3 aż do 42% w sytuacji kiedy nie jest jasne, w jakim stopniu dwie zastosowane funkcje wyczerpują zbiór możliwych krzywych opisujących rozkład zwłaszcza powyżej $p_T=8$ GeV/c. Przypuszczam że krótki komentarz, np. o zależności opisywanej niepewności od pędu poprzecznego mógłby rozwiązać te wątpliwości.

Rozdziały VII i VIII zawierają omówienie i podsumowanie wyników uzyskanych w pracy. Wszystkie uzyskane wyniki są bardzo ciekawe, a niektóre wręcz nieoczekiwane. Produkcja wyższych stanów $\Upsilon(2S)$, $\Upsilon(3S)$ okazuje się niższa niż przewidywania wszystkich rozpatrywanych modeli. Podobnie ich względne stosunki do stanu $\Upsilon(1S)$ lądują niżej niż cytowana kompilacja światowych danych, inna rzecz że ta ostatnia nie zawiera żadnych danych w sąsiedztwie pomiaru STAR. Rozkład pospieszności mezonów Υ wykazuje silne wypłaszczenie w porównaniu z cytowanym pomiarem przy energii 200 GeV, włącznie z formowaniem centralnego minimum. W ramach sporych niepewności, względna krotność Υ i J/ψ przy energiach RHIC i LHC wykazuje uniwersalną, silniejszą niż liniową zależność od względnej krotności cząstek wyprodukowanych, co może stanowić przyczynku do jej opisu za pomocą modelu perkolacji strun. Nie obserwuje się wyraźnego skalowania x_T dla produkcji Υ .

Autor wykazuje bardzo daleko idącą powściągliwość w dyskusowaniu wyników swojej pracy. Jest to świadectwem dojrzałości naukowej gdyż – wobec silnej merytorycznej podbudowy sformułowanej w poprzednich rozdziałach – dane eksperymentalne mówią poniekąd same za siebie. Trudno jednak nie stwierdzić, że stanowić one będą cenne wyzwanie dla przyszłych badań teoretycznych.

O ile rozprawa Pana mgr Kosarzewskiego napisana jest starannie pod względem logicznym i merytorycznym, o tyle na poziomie edytorskim nie brakuje w niej usterek. Ograniczam się do zasygnalizowania błędnej masy stanu $\eta_c(1S)$ w tabeli 1.1 i stwierdzenia że wartość błędu całkowitego w pierwszej kolumnie tabeli 5.8 jest niezrozumiała biorąc pod uwagę sposób liczenia błędów w pozostałych kolumnach. Pozostałe dość liczne ustereki nie wpływają na wysoką ocenę pracy i w związku z tym nie wymagają wzmianki, lecz wskazana byłaby ich korekta przed szerokim upowszechnieniem rozprawy.

Podsumowując, uważam że rozprawa doktorska pana mgr Leszka Kosarzewskiego zatytułowana „Study of quarkonium production in relativistic proton-proton collisions in the STAR experiment” zawiera nowe, ciekawe i ważne wyniki dotyczące produkcji mezonów Υ i J/ψ w zderzeniach protonów przy energiach akceleratora RHIC. Wyniki te mogą się przyczynić do pogłębienia wiedzy o oddziaływaniu silnym we wspomnianych zderzeniach, mogą też służyć jako cenne dane referencyjne dla badań nad plazmą kwarkowo-gluonową w zderzeniach ciężkich jonów. Autor wykazał się dogłębną znajomością tematyki fizycznej i bardzo wysokim poziomem wiedzy o różnych aspektach analizy doświadczalnej. Zawarte w niniejszej recenzji uwagi krytyczne nie umniejszają poznawczej wartości rozprawy.

Recenzowana rozprawa doktorska spełnia warunki ustawowe stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie pana mgr Leszka Kosarzewskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.