



Arkadiusz Bubak
Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych
Uniwersytet Śląski
e-mail: arkadiusz.bubak@us.edu.pl

Chorzów, 25 listopada 2025 roku

Recenzja rozprawy doktorskiej

„ $K^*(892)^0$ production in Ar+Sc collisions at CERN SPS energies measured by NA61/SHINE”

Przedmiotem ocenianej rozprawy doktorskiej autorstwa mgra Bartosza Kozłowskiego jest szczegółowa analiza produkcji krótkożyciowego rezonansu hadronowego $K^*(892)^0$ w relatywistycznych zderzeniach jąder argonu ze skandem (Ar+Sc), przeprowadzonych w ramach eksperymentu NA61/SHINE realizowanego na akceleratorze Super Proton Synchrotron (SPS) w ośrodku CERN.

Badania zostały wykonane dla trzech wartości pędu wiązki: 40A, 75A oraz 150A GeV/c, przy czym analizie poddano 10% najbardziej centralnych zderzeń, wyselekcjonowanych na podstawie energii zdeponowanej w kalorymetrze PSD (określanym w NA61/SHINE także jako „detektor energii spektatorów”). Głównym celem rozprawy było wyznaczenie rozkładów kinematycznych produkcji rezonansu, oszacowanie jego średnich krotności oraz parametrów termicznych widm poprzecznych. Na tej podstawie, poprzez analizę stosunku $\langle K^* \rangle / \langle K \rangle$, dokonano estymacji dolnych ograniczeń czasu pomiędzy wymrożeniem chemicznym a kinetycznym w układzie Ar+Sc. Tematyka pracy jest w pełni zgodna z aktualnym programem badawczym eksperymentu NA61/SHINE, w szczególności z zakresem tzw. system-size scan, którego celem jest pogłębione zrozumienie ewolucji właściwości materii silnie oddziałującej w zależności od energii zderzenia oraz rozmiaru układu. Zagadnienia te należą do kluczowych problemów współczesnej fizyki wysokich energii, pozostając w ścisłym związku z badaniami nad przejściem fazowym QCD oraz dynamiką fazy hadronowej w relatywistycznych zderzeniach jąder.

Rozprawa liczy około 115 stron i napisana została poprawnym, klarownym językiem angielskim, z zachowaniem wysokiej kultury edytorskiej. Autor we wprowadzeniu kompetentnie przedstawia podstawy Modelu Standardowego i fizyki oddziaływań silnych, koncentrując się następnie na diagramie fazowym QCD oraz kluczowych koncepcjach związanych z ewolucją zderzeń ciężkich jonów. Trafnie omówiono procesy termalizacji, powstawania plazmy kwarkowo-gluonowej, hadronizacji oraz dwustopniowego wymrożenia: chemicznego i kinetycznego. Autor poprawnie podkreśla, iż rezonanse krótkożyciowe, w szczególności $K^*(892)^0$ o średnim czasie życia ok. 4 fm/c, stanowią skuteczne narzędzie badania czasu trwania fazy hadronowej, ze względu na ich podatność na procesy rescatteringu oraz możliwą regenerację po wymrożeniu chemicznym. Ta część wprowadzenia jest napisana z dużą świadomością fizyczną, stanowi dobry przegląd literatury i w sposób spójny prowadzi do właściwego celu pracy.



Następnie autor przedstawia istotę programu badawczego NA61/SHINE oraz aparaturę eksperymentalną, ze szczególnym uwzględnieniem układu TPC i systemu kalorymetrii PSD. Opis ten jest kompletny, poprawny i pokazuje bardzo dobrą znajomość eksperymentu, jego architektury i głównych komponentów. W odniesieniu do selekcji danych warto podkreślić, że autor w pełni jawnie podaje progi energii detektora PSD dla wyboru 10% najbardziej centralnych zdarzeń we wszystkich analizowanych energiach, co stanowi praktykę poprawną i często niestety pomijaną w innych pracach doktoranckich. Ta skrupulatność jest bardzo pozytywnym elementem rozprawy i sprzyja powtarzalności analiz.

Metody selekcji torów i identyfikacji cząstek zostały przeprowadzone z należytą starannością, zgodnie z dobrą praktyką. Autor stosuje klasyczną identyfikację dE/dx w komorach TPC, opisuje kryteria selekcji śladów, odrzucania torów o niskiej jakości rekonstrukcji i obszary trudności wynikające z nakładania się krzywych Bethe-Blocha dla różnych gatunków cząstek. Struktura analizy, jej argumentacja oraz sposób prezentacji dowodzą dobrej świadomości ograniczeń metody i warunków eksperymentalnych.

Kluczowym elementem pracy jest rekonstrukcja rezonansu $K^*(892)^0$ z wykorzystaniem metody szablonowej, pierwotnie opracowanej w analizach zderzeń $p+p$ eksperymentu NA61/SHINE. Autor prawidłowo przenosi tę metodę na układ zderzeń jąder średnich, stosując dopasowania rozkładów mas niezmienniczych dla par $K^+\pi^-$ w przedziałach pospiesznosci i pędu poprzecznego. W analizie zastosowano metodę szablonową, w której kształt sygnału rezonansu $K^*(892)^0$ opisany jest rozkładem MC o kształcie funkcji Breit-Wignera z uwzględnioną rozdzielczością detektora, natomiast tło modelowane jest za pomocą empirycznych funkcji dobranych zależnie od zakresu kinematycznego. Szczególnie ważne jest, że autor bada stabilność wyniku poprzez wariacje zakresów dopasowań, modeli tła, kryteriów selekcji torów i parametrów symulacji. Analiza niepewności systematycznych jest szeroka, poprawnie udokumentowana i zgodna ze standardami przyjętymi w NA61/SHINE, co należy uznać za przykład rzetelności i wysokiego poziomu świadomości eksperymentalnej.

Wyniki obejmują rozkłady p_t , m_t , pospiesznosci, wartości średnich krotności rezonansu oraz średnie pędy poprzeczne w badanych energiach. Są to pierwsze tego typu pomiary dla układu $Ar+Sc$ w zakresie energii SPS, co nadaje pracy wyraźny wymiar oryginalności i znaczenia dla współpracy NA61/SHINE oraz szerszej społeczności fizyki wysokich energii. Autor pokazuje, że modele EPOS1.99 oraz FTTP-BERT nie w pełni odtwarzają obserwowane rozkłady i ich normalizacje, co pozostaje w zgodzie z wcześniejszymi obserwacjami w literaturze i stanowi wartościowy wkład w testowanie efektywności modeli transportowych opisujących procesy hadronizacji i ewolucji ośrodka hadronowego. Zastosowanie stosunku $\langle K^* \rangle / \langle K \rangle$ do oszacowania czasu między wymrożeniami (freeze-out) zostało przeprowadzone poprawnie i prowadzi do wyników zgodnych z globalnymi trendami obserwowanymi w układach o różnych rozmiarach, od $p+p$ po $Pb+Pb$. Wyniki te jednoznacznie potwierdzają obecność efektów rescatteringu prowadzących do tłumienia widocznej liczby rezonansów w układach średnich.

Praca jest starannie przygotowana od strony wizualnej, wykresy są czytelne, osie opisane poprawnie, a objaśnienia klarowne. Styl prezentacji jest precyzyjny, uporządkowany i pozbawiony niejasności, co ułatwia lekturę również osobom spoza ścisłej poddziedziny analizy rezonansów hadronowych. W treści pracy nie zauważyłem istotnych błędów stylistycznych ani językowych, poza sporadycznymi literówkami lub nielicznymi sformułowaniami, których przykłady zamieszczam poniżej: (1) w abstrakcie autor cytuje artykuł metodą opisową „...method introduced in [...] (Eur. Phys. J. C 80, 460, 2020)” zamiast użycia odsyłacza literaturowego, (2) „odwrotnych parametrów nachylenia”, zamiast „parametrów odwrotnego nachylenia” (inverse slope parameters) w polskim



streszczeniu, (3) „Fermions is a group” zamiast „Fermions are a group” w rozdziale 1.1, (4) anticolour → anticolour w rozdziale 1.1, (5) Zdanie „All quarks are charged and has fractional charge...” – podmiot *all quarks* wymaga orzeczenia w liczbie mnogiej → „All quarks are charged and have fractional electric charges...” w rozdziale 1.1, (6) signalizing → „signalling” (British English) lub „signaling” (American English) w rozdziale 1.4, (7) w rozdziale 1.1 użyto słowa „mediators” na określenie bozonów pośredniczących w oddziaływaniach. Termin ten jest zrozumiały i poprawny, ale częściej używa się „gauge bosons” (bozony cechujące) lub po prostu „force carriers”, (8) użyto PBD zamiast BPD w podpisie rysunku 20 (rozdział 4.1), (9) brakuje oznaczenia „/c” przy jednostkach pędu poprzecznego w tabeli 15 (rozdział 6.3), (10), accessed → accessed w pozycji [4] bibliografii, (11) „Hadrons (*fermions*) build from” → „Hadrons (*fermions*) built from” w kilku różnych miejscach pracy, (12) w rozdziale 1.1 Standard Model autor pisze, że „kwantowe liczby przypisywane kwarkom obejmują m.in. ładunek elektryczny (Q), izospin (I), dziwność (S), powab (C) oraz piękno (B) i prawdę (T), odpowiadające odpowiednio kwarkom bottom i top. Jednak we współczesnej fizyce cząstek preferuje się nazwy bottom i top, a liczba kwantowa prawda (T, truth) jest obecnie rzadko używana.

Wszystkie powyższe uchybienia są jednak akceptowalne, mogące wystąpić w każdej pracy i pozostają bez wpływu na merytoryczny odbiór tekstu. Choć praca nie zawiera istotnych braków ani elementów podważających przedstawione wyniki, z perspektywy recenzenta dostrzegam kilka kwestii, które mogłyby ją dodatkowo wzbogacić.

Po pierwsze, autor wykorzystuje modele EPOS1.99 oraz FTTP-BERT do porównań z danymi eksperymentalnymi. Dobór tych generatorów jest w pełni uzasadniony ich szerokim zastosowaniem w analizach hadronowych prowadzonych w zakresie energii dostępnych w eksperymencie NA61/SHINE. Niemniej jednak, interesującym uzupełnieniem byłoby rozważenie dodatkowych modeli transportowych, takich jak UrQMD (S.A. Bass *et al.*, Prog. Part. Nucl. Phys. 41 (1998) 255; M. Bleicher *et al.*, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 25 (1999) 1859) lub SMASH (J. Weil *et al.*, Phys. Rev. C 94 (2016) 054905), które są szeroko stosowane w modelowaniu dynamiki relatywistycznych zderzeń ciężkich jonów np. w eksperymentach HADES, STAR, ALICE (Rys. 11: EPOS3 z & bez UrQMD), a także samym NA61/SHINE w pracy „ $K^*(892)^0$ Resonance Suppression in Ar+Sc Collisions at SPS Energies” (arXiv:2509.07568 – aczkolwiek to już w praca z 9 września 2025, czyli możliwe, że już po złożeniu pracy doktorskiej przez mgra Bartosza Kozłowskiego) oraz w symulacjach dla FAIR czy NICA. Modele te pozwalają na bardziej szczegółowe uwzględnienie efektów oddziaływań hadronowych w fazie końcowej. Ich porównanie z modelami EPOS i FTTP-BERT mogłoby dostarczyć cennych informacji na temat wpływu modeli transportowych na estymację rozkładów kinematycznych oraz właściwości produkowanego rezonansu $K^*(892)^0$. Pozwoliłoby to na ocenę systematycznych różnic wynikających z wyboru generatora hadronowego oraz na bardziej kompleksową weryfikację stabilności uzyskanych rezultatów. Pozwoliłoby to także szerzej zilustrować, jak różne mechanizmy modelowe radzą sobie z opisem procesów rescatteringu i regeneracji. Model EPOS1.99 oferuje także możliwość integracji z UrQMD jako fazą hadronową (afterburner). Z uwagi na brak informacji o takim zastosowaniu w pracy, mogę przypuszczać, że konfiguracja ta nie została użyta.

Po drugie, w podsumowaniu autor pisze, że „stosunek $\langle K^*(892)^0 \rangle / \langle K^\pm \rangle$ [...] dla 40A GeV/c praktycznie nie ulega supresji. Wyniki dla 75A i 150A GeV/c są podobne. Supresja $K^*(892)^0$ w Ar+Sc przy 150A GeV/c jest zbliżona do supresji w Pb+Pb”. To sformułowanie sugeruje zarazem brak supresji (dla 75A i 150A, skoro „są podobne” do 40A – tak rozumiałbym zdanie z podsumowania – może tylko niefortunne sformułowanie) oraz istotną supresję (skoro 150A porównano z Pb+Pb). Należałoby to doprecyzować, szczególnie w podsumowaniu, jasno opisując,



że supresja narasta z energią, np. „Supresja produkcji $K^*(892)^0$ w $Ar+Sc$ jest znikoma przy 40A GeV/c, natomiast przy 75A i 150A GeV/c staje się coraz silniejsza, a dla 150A GeV/c osiąga poziom porównywalny z obserwowanym w centralnych zderzeniach Pb+Pb”. Według już wcześniej wspomnianej publikacji z września 2025 roku (arXiv:2509.07568), dotyczącej produkcji i tłumienia rezonansu $K^*(892)^0$ w zderzeniach $Ar+Sc$, przy 40A GeV/c, stosunek $\langle K^*(892)^0 \rangle / \langle K^+ \rangle$ jest zbliżony do wartości z p+p, co oznacza brak istotnej supresji - rezonans nie ulega znacznemu zanikowi w fazie hadronowej. Przy 75A GeV/c obserwuje się umiarkowaną supresję, czyli częściowy zanik rezonansu wskutek rescatteringu, zaś przy 150A GeV/c supresja jest wyraźna i porównywalna z tą obserwowaną w Pb+Pb, co wskazuje na dłuższą fazę hadronową i silniejsze oddziaływania wtórne.

Podkreślam jednak, że powyższe punkty stanowią jedynie sugestie rozwojowe, a nie zastrzeżenia do sposobu przeprowadzenia analizy. Praca w obecnym kształcie jest kompletna i w pełni spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim o charakterze eksperymentalnym.

Podsumowując, rozprawa mgr Bartosza Kozłowskiego jest dojrzałym, wartościowym opracowaniem naukowym. Autor wykazał się znakomitą wiedzą eksperymentalną, umiejętnością stosowania zaawansowanych metod analizy danych oraz zdolnością do wnikliwej interpretacji wyników. Przedstawione pomiary są oryginalne, mają znaczącą wartość dla programu badawczego NA61/SHINE oraz dla szeroko pojętych badań nad właściwościami materii silnie oddziałującej. Wyniki te z pewnością zostaną dostrzeżone i cytowane w literaturze. Rozprawa spełnia wszystkie kryteria przewidziane dla prac doktorskich o charakterze eksperymentalnym, a jej autor wykazał pełną zdolność do prowadzenia samodzielnych badań naukowych na wysokim poziomie.

Po przeprowadzeniu analizy treści rozprawy doktorskiej stwierdzam, że przedłożona praca spełnia wszystkie wymagania określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2023 r. poz. 742 z późniejszymi zmianami), a także w aktach wykonawczych. Rozprawa wykazuje istotny wkład naukowy w rozwój fizyki wysokich energii, potwierdza samodzielność badawczą autora, jego kompetencje w zakresie zaawansowanej analizy danych eksperymentalnych oraz zdolność do ich interpretacji w kontekście aktualnego stanu wiedzy w dyscyplinie. W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie mgr Bartosza Kozłowskiego do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Arkadiusz Bubak