



NUCLEAR PHYSICS DIVISION
UNIVERSITY OF WARSAW



**FACULTY OF
PHYSICS**
UNIVERSITY
OF WARSAW

Krzysztof Piasecki
Wydział Fizyki
Uniwersytet Warszawski
E-mail: krzysztof.piasecki@fuw.edu.pl

Warszawa, 17.01.2025

Rada Naukowa Instytutu Fizyki
Uniwersytet Śląski w Katowicach

Recenzja pracy doktorskiej "Measurements of strangeness production in heavy-ion collisions in the NA61/SHINE experiment" autorstwa mgr. Yulii Balkovej

Przedmiotem badań niniejszej pracy była rekonstrukcja emisji hiperonów Λ ze zderzeń, w których jony ^{40}Ar rozpędzone do trzech wartości pędu: 40, 75 i 150 GeV/nukleon zderzały się z jądrami ^{45}Sc w stacjonarnej tarczy i były rejestrowane przez spektrometr NA61/SHINE, a analiza dotyczyła 10% najbardziej centralnych zderzeń. Hiperony Λ rekonstruowano z produktów w wiodącym kanale rozpadu na $p + \pi^-$ (prawdopodobieństwo $\sim 64\%$). Wydaje się tu, że choć tytuł całkowicie zawiera temat badawczy, to obejmuje on nadmiernie duży obszar wobec rzeczywistego pola analizy.

Aspekt formalny. Praca napisana jest w języku angielskim, bezbłędnie i w płynnym stylu. Posiada czytelną stronę tytułową, streszczenie po angielsku i po polsku oraz spis treści. Po krótkim wprowadzeniu i deklaracji własnego wkładu, praca dzieli się na 5 części, poświęconych kolejno: wprowadzeniu teoretycznemu, układowi badawczemu NA61/SHINE, analizie danych, przedstawieniu wyników i podsumowaniu. Zakończona jest czytelną bibliografią oraz listą rysunków i tabel. Rysunki w pracy są czytelne, w tym posiadają informatywne opisy osi i podpisy (z nielicznymi wyjątkami). Również tabele: są czytelne i posiadają podpisy na szczytach. Łącznie, praca ma ok. 130 stron.

Rozdział pierwszy Autorka rozpoczyna od wyłożenia fundamentów Modelu Standardowego, przechodząc ku podstawom chromodynamiki kwantowej. Następnie, wprowadzając diagram fazowy materii oddziałującej silnie na płaszczyźnie temperatura - potencjał bariochemiczny ($T - \mu_B$), mgr. Balkova omawia przewidywane sposoby przejścia z fazy hadronowej do plazmy kwarkowo-gluonowej (QGP). Zarysowuje dalej przebieg ultra-relatywistycznego zderzenia jądrowego, wprowadzając prosty Model Zranionych Nukleonów (WNM), do którego w ostatnim rozdziale pracy porówna wyniki. Pewnym mankamentem jest brak wspomnienia przewidywanego przez QCD w sektorze hadronowym częściowego przywrócenia symetrii chiralnej, które modyfikuje m. in. masy hadronów w gęstej i gorącej materii QCD, co może prowadzić do powstania pośredniego obszaru na diagramie fazowym, zwanego materią kwarkionową (quarkyonic). Spośród sygnatur QGP Autorka uwypukla zwiększenie produkcji dziwności. Ukazuje ona to zwiększenie na wykresie krotność produkcji (anty-)hiperonów na zraniony nukleon w funkcji tychże nukleonów w układach p+A i Pb+Pb, oraz funkcji wzbudzenia stosunków krotności: $\langle K^+ \rangle / \langle \pi^+ \rangle$ oraz $[\langle \Lambda \rangle + \langle K + \bar{K} \rangle] / \langle \pi \rangle$. Przebiegi owych systematyk wykazują zastanawiającą różnicę między wynikami dla zderzeń pp a Pb+Pb. Dlatego istotną jest rekonstrukcja rozkładów kinematycznych i krotności m. in. hiperonów Λ ze zderzeń jąder o rozmiarach pośrednich, których dobrym przykładem jest Ar+Sc, będący przedmiotem pracy. Drobnym mankamentem jest niezdefiniowanie energii progowej, omawianej na s. 11: jest ona domyślnie rozważana w zmiennej \sqrt{s} , natomiast przy stacjonarnej tarczy bywa rozpatrywana w zmiennej energii kinetycznej lub pędu wiązki.

Rozdział drugi otwiera program badań grupy NA61 będący skanem doświadczalnym w przestrzeni energii wiązki i rozmiarów jąder. Następnie Autorka omawia układ przyspieszający wiązkę w CERN'ie oraz stojący na jej drodze spektrometr NA61: wpraw całościowo, a następnie przechodząc do kolejnych detektorów. Wspomniane są tu np. pomiary bez tarczy, służące ocenie błędów systematycznego zdarzeń spoza tarczy. Omówione jest, jak łączna informacja z detektorów S1,2,5, V1 i PSD formuje główny tryger zderzeń centralnych i trygery poboczne. Opisane zostały też główne parametry techniczne komór projekcji czasowej (VTPC-1,2 i MTPC-L/R) i detektora PSD. Do tego rozdziału zgłosiłbym **dwie uwagi**.

- Jaka jest szansa interakcji w tarczy, a zatem i dwóch reakcji (np. przyjmując rozkład Poissona) ?
- Przydałaby się informacja o granulacji ważnych detektorów, co wskazywałoby rozdzielczość kątową.

Ścieżce analizy danych poświęcony jest **rozdział trzeci**. Autorka przejrzysto omówiła drogę składania sygnałów z detektorów wiązki i komór czasowych: te pierwsze dają ekstrapolację miejsca przejścia jonu wiązki w tarczy, a drugie – tory globalne. Połączenie obu grup danych dostarcza wierzchołka reakcji. Czytelnik dowiaduje się też, w jaki sposób z torów spoza tarczy składani są kandydaci na produkty rozpadu cząstki neutralnej (tu: p i π z rozpadu Λ) oraz o składaniu energii zdeponowanej docelowo przez fragment pociskopodobny, co służy ocenie centralności zderzenia. Przedstawione są też ramy symulacji wydajnościowej. Omawiając kryteria selekcji zdarzenia, autorka celnie dzieli je na niezaburzające i zaburzające pomiar. Wkład tych drugich (dot. wierzchołka zderzenia i cięcia na proxy centralności) na błędy systematyczne został klarownie objaśniony. Czytelnik otrzymuje również zestawienie statystyk próbek przed i po tych cięciach. Następnie, po przedyskutowaniu cięć na tory, mgr Balkova omawia cięcia na zmienne topologii zrekonstruowanego kandydata na Λ : jego długość toru lotu oraz kątowe odstępstwo między wektorami przemieszczenia i pędu. Optymalizacji wartości cięcia poświęcony jest zaś podrozdział 3.5. Przy doborze najlepszych filtrów, sygnał na widmie masy niezmienniczej (rys. 3.11) jest wyraźnie widoczny jako wąskie maksimum nad wolnozmiennym tłem. Przy założonej formie analitycznej (równ. 3.5 i 3.6), widmo takie zostaje dopasowane w każdej komórce przestrzeni fazowej $p_T - y$ (pęd poprzeczny – popieschność), skąd Autorka otrzymuje surowe rozkłady populacji cząstek Λ w tejże przestrzeni, dla trzech energii wiązki (rys. 3.12). Następnie, mgr Balkova przedstawia mapy czynnika korekcji (odwrotności czynnika wydajności), klarownie objaśniając sposób oceny niepewności. Osobny podrozdział 3.7 poświęcony jest ilościowej prezentacji niepewności doświadczalnych kilku rodzajów w zależności od podobszaru przestrzeni fazowej, dla 3 energii wiązki. Podział na klasy tych niepewności uważam za bardzo celny. Na koniec, ukazane są dwa testy wzorcowe: rozkład Armenterosa-Podolańskiego oraz rozkład czasów życia. W pierwszym przypadku widzimy sukcesywne oczyszczanie się wykresu z kolejnymi etapami cięć, do oczekiwanej postaci półelipsy we właściwym obszarze, a w drugim – zgodność (w ramach niepewności) czasów życia z wartością stabilizowaną we wszystkich fragmentach przestrzeni fazowej, dla 3 energii wiązek.

Do tego rozdziału mam **kilka pytań**:

- Ukazane na rys. 3.11 maksimum składa się z niewielu słupków histogramu, choć statystyka wydaje się pozwalać na rozdrobnienie. Czy dopasowanie modelowe uwzględnia korekcję efektu binowania? (np. w przypadku ROOT'a byłaby to opcja I). Warto oszacować niepewność systematyczną tego efektu.
- Jeśli tło szacowane jest jako całka z dopasowanej funkcji, to mam wątpliwość, czy Significance wg. rozdz. 3.5 jest najlepszym kryterium. Significance u podstaw jest stosunkiem $S/\Delta S$. Jeśli w przedziale M_{inv} zmierzono T wszystkich przypadków, a ilość tła B byłaby zrekonstruowana techniką mieszania zdarzeń. Wówczas statystyka B byłaby tak wysoka, że można przyjąć $\Delta B \approx 0$. Sygnał otrzymałoby się

przez odjęcie (mamy $T = S + B$, więc $S = T - B$), przy czym z prawa propagacji błędów wynikałoby, że $\Delta S \approx \sqrt{T} = \sqrt{S + B}$. Tymczasem w pracy, ekstrakcja S i ΔS zachodzi bezpośrednio w wyniku dopasowania. Zatem kryterium wychodziłoby na $S/\Delta S$. Spodziewając się, że wpływ na wyniki jest niewielki i rozumiejąc, że ew. zmiana dotyczyłaby wszystkich rozkładów, sugeruję jedynie dyskusję relatywnego odstępstwa między użytą techniką a podejściem zaproponowanym tutaj na wybranych przykładach. Zmienną porównywaną może być np. suma przypadków w rozkładzie surowym p_T w „typowym” przedziale y (lub podobna).

- Na wykresach 3.15-17 (lub w ich podpisach) brakuje objaśnienia jednostek osi pionowej.

Prezentacji otrzymanych wyników fizycznych poświęcony jest **rozdział czwarty**. Należy tu zachwalić, że każdemu z punktów danych towarzyszy niepewność statystyczna oraz systematyczna. Prezentacja obejmuje dwuwymiarowe rozkłady krotności hiperonów Λ w przestrzeni p_T - y , ujęte tak w postaci map (rys. 4.1 – 4.3), jak i rozkładów p_T w kolejnych przedziałach y (rys. 4.4 - 4.6). Następnie Autorka omawia drogę do otrzymania rozkładów prędkości poprzez rzutowanie tychże rozkładów p_T na oś y . Pomiar rozkładu siłą rzeczy cechuje ograniczona akceptancja. Aby „załatać” niewielkie obszary martwe, do ekstrapolacji Autorka używa parametryzację fenomenologiczną (równ. 4.1) zgodną z danymi, poszerzając niepewność systematyczną o bezpieczny margines. Otrzymuje w ten sposób rozkłady prędkości (4.7), skąd rekonstruuje krotności scałkowane oraz różniczkowe przy $y \approx y_{CM}$ (tabela 4.1). Rozkład prędkości przechodzi z bardziej skupionego przy 40A GeV do wydłużonego (150A GeV), co koresponduje ze słabnięciem stoppingu materii z energią wiązki w tym obszarze. Ponieważ jednak dzięki parametryzacji 4.1 rozkładów p_T Autorka otrzymała również parametry odwrotnego nachylenia, to ich rozkłady w funkcji y zostały ukazane na rys. 4.8.

Rozkłady doświadczalne zostały następnie porównane z przewidywaniami dwóch odmiennych modeli transportu: EPOS1.99 zawierającego opis strunowy i SMASH 2.0 – bez tego opisu. Dla każdej z obserwabli, SMASH przewidywał wyraźnie niższe wartości. Predykcje EPOS są bardziej zniuansowane: w ujęciu ogólnym rozkłady odwrotnego nachylenia cechuje tu zniżenie, ale mniejsze. Dla rozkładów prędkości zniżenie jest tu także mniejsze, choć przy 150A GeV bardzo zbliżone do doświadczenia w ramach niepewności, a poziom zgodności przy krotności scałkowanej jest jeszcze wyższy.

Niemniej cennym fizycznie jest porównanie wyników na tle dostępnych danych doświadczalnych przy sąsiednich energiach i rozmiarach układu. Z zestawień wyłania się następujący obraz: dane dla Ar+Sc ogólnie wpisują się w otoczenie w funkcji powyższych zmiennych. Przy ustalonej energii: krotność Λ , stosunek krotności Λ/π oraz stosunek $[\Lambda + K + \bar{K}] / \pi$ zawsze rośnie w funkcji liczby zranionych nukleonów $\langle W \rangle$. Natomiast wzrost ten jest zawsze silniejszy od przewidywań modelu WNM, czyli ośrodek silnie sprzyja produkcji Λ . Ponadto, ciekawie wygląda zachowanie $[\Lambda + K + \bar{K}] / \pi$ w funkcji energii dostępnej: choć wysokość tego stosunku dla Ar+Sc zbliża się do wysokości dla ciężkiego systemu Pb+Pb, to otrzymany przez Autorkę profil ma kształt bardziej zbliżony do przypadku p+p, a więc jest pozbawiony „rogu” widocznego dla Pb+Pb (w ramach poznanych danych). Należy stwierdzić, że szczególnie ten wynik oraz wypełnianie pustych obszarów na zależnościach od $\langle W \rangle$ ukazują istotną wagę przeprowadzonej przez Autorkę analizy.

Do niniejszego rozdziału pytania mam następujące:

- odnośnie ekstrapolacji widm p_T celem utworzenia rozkładu y : typowo jak ważnym jest wkład do niepewności systematycznych od niepewności ekstrapolacji, w porównaniu do reszty wkładów?
- odnośnie krotności sumarycznej: jak duży jest wkład od wszystkich ekstrapolacji łącznie wobec wkładu z punktów doświadczalnych?

Pracę kończy **podsumowanie** oraz **bibliografia**, której dobór należy uznać za adekwatny.

Moim zdaniem, dysertacja mgr Yulii Balkovej bez wątpienia **spełnia wymagania** stawiane pracom doktorskim przez Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Dlatego **wniosuję o dopuszczenie mgr Yulii Balkovej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**

Krzysztof Piasecki

