

**Recenzja osiągnięć naukowo-badawczych dr inż. Hanny Zbroszczyk w postępowaniu habilitacyjnym pt. „Eksperymentalne Aspekty Badania Korelacji Femtoskopowych w Zderzeniach Relatywistycznych Ciężkich Jonów”**

Pani dr inż. Hanna Zbroszczyk ukończyła z wyróżnieniem studia na Politechnice Warszawskiej na Wydziale Fizyki w 2004 r. Prace magisterską pt. „STAR experiment result in application to hadron analysis in the ALICE experiment” wykonała pod kierunkiem prof. dr hab. Jana Pluty. W latach 2004-2008 swoje zainteresowania fizyką wysokich energii kontynuowała na studiach doktoranckich na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej, pod kierunkiem prof. dr hab. Jana Pluty, a także w laboratorium SUBATECH na Uniwersytecie w Nantes (Francja) pod kierunkiem prof. dr hab. Barbary Erazmus w ramach systemu „współopieki”. Prace doktorską pt. „Studies of baryon-baryon correlations in relativistic nuclear collisions registered at the STAR experiment” obroniła w czerwcu 2008 r.

Jako główne naukowe osiągnięcie w postępowaniu habilitacyjnym dr inż. Hanna Zbroszczyk przedstawiała monografię pt. „Eksperymentalne Aspekty Badania Korelacji Femtoskopowych w Zderzeniach Relatywistycznych Ciężkich Jonów”. W monografii całościowo omawia pomiary femtoskopowych korelacji, oraz te wykonane przy udziale Habilitantki w ramach eksperymentu STAR działającym przy akceleratorze Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) w Brookhaven National Laboratory (BNL), USA. Należy podkreślić, że tematyka prac, w których dr inż. Hanna Zbroszczyk była i nadal jest zaangażowana ściśle wiąże się z głównym celem fizyki ciężkich jonów jakim jest zbadanie własności plazmy kwarkowo-gluonowej (PKG) wytwarzanej w oddziaływaniach jądrowych przy relatywistycznych energiach. W szczególności, femtoskopowe pomiary pozwalają na badanie kolektywnej ekspansji gorącej i gęstej materii kwarkowo-gluonowej, a także pozwalają na weryfikację szeregu modeli PKG, np. modelu hydrodynamicznego, przyczyniając się do lepszego poznania czasoprzestrzennej ewolucji układu.

Przedstawiona do recenzji monografia składa się z ośmiu rozdziałów i może być traktowana jako całościowy opis tematyki femtoskopowych pomiarów w eksperymentach fizyki zderzeń ciężkich jonów z uwypukleniem pomiarów w eksperymencie STAR, czyli tematyki, którą zajmuje się Habilitantka. Po krótkim wstępie, w rozdziale drugim omówiono najważniejsze zjawiska związane z fizyką ciężkich jonów w tym omówiono fundamentalne składniki materii, diagram fazowy chromodynamiki kwantowej (QCD), proces wytwarzania plazmy kwarkowo-gluonowej w oddziaływaniach jądrowych.

W rozdziale trzecim przedstawiono rozwój metody pomiarów femtoskopowych korelacji, ich podstawy teoretyczne. Omówiono przypadek femtoskopowych korelacji dla identycznych i nieidentycznych cząstek, a także pierwsze oraz najnowsze rezultaty z tej dziedziny, uzyskane w eksperymentach przy akceleratorach AGS, SPS, RHIC oraz LHC. Ważnym rozdziałem w przedstawionej monografii jest rozdział 3.5.5, w którym omawiane są dwu-barionowe korelacje zmierzone w eksperymencie STAR w oddziaływaniach Au+Au przy energii  $\sqrt{s_{NN}}=200$  GeV. W tą tematykę wkład wniosła Habilitantka. W publikacji **Nature 527 (2015) 345-348**, wykonanej w ramach współpracy STAR (z udziałem Habilitantki na poziomie 15%) pokazano, że rozmiary źródła oszacowane przy pomocy femtoskopowych korelacji z uwzględnieniem “resztkowych oddziaływań” dla par  $pp$  i  $p\bar{p}$  są konsistentne. W rozdziale 3.5.5.2 Habilitantka przedstawia następne osiągnięcie, opublikowane w artykule **Phys. Rev. C 89 (2014) 054916** (szacowany udział 30%), gdzie pokazano, że uwzględnienie “resztkowych oddziaływań” w funkcji korelacji pozwala na uzyskanie spójnego opisu rozmiaru źródła w oparciu o badanie emisji par  $p\bar{\Lambda}$ ,  $\bar{p}\Lambda$  oraz  $p\Lambda$ ,  $\bar{p}\bar{\Lambda}$  w oddziaływaniach Au+Au przy energii  $\sqrt{s_{NN}}=200$  GeV. W tym samym rozdziale, dla tego

samego systemu, przedstawiono również rezultaty dla femtoskopowych korelacji  $\Lambda\Lambda$  i  $\bar{\Lambda}\bar{\Lambda}$  istotne dla poznania oddziaływań silnych hiperonów. W publikacji **Phys. Rev. Lett. 114 (2015) 022301** wykonanej w ramach współpracy STAR (szacowany udział Habilitantki 10%) stwierdzono, że wyznaczony promień źródła dla hiperonów jest zgodny z oczekiwaniami z poprzednich pomiarów femtoskopowych korelacji z udziałem pionów, kaonów i  $p\Lambda$ , a ich oddziaływanie jest raczej słabe. W dalszym rozdziale 3.6 omówiono rezultaty dla trójwymiarowej femtoskopowych korelacji uzyskane w eksperymencie STAR dla oddziaływań Au+Au i Cu+Cu przy energii  $\sqrt{s_{NN}} = 64.3$  GeV i 200 GeV, oraz w eksperymencie ALICE dla zderzeń Pb+Pb, p+Pb i pp przy energiach akceleratora LHC. Następnym istotnym rozdziałem w monografii jest rozdział 3.7, w którym omawiane są rezultaty dla femtoskopowych korelacji eksperymentu STAR w oddziaływaniach Au+Au przy różnych energiach  $\sqrt{s_{NN}} = 7.7 - 200$  GeV i różnych centralnościach zderzeń (ang. beam energy scan, BES). Rezultaty te mogą dostarczyć istotnych informacji dla lepszego poznania diagramu fazowego QCD. W tym rozdziale przedstawiono rezultaty z publikacji **Phys. Rev. C92 (2015) 014904** wykonanej w ramach współpracy STAR (szacowany udział Habilitantki 10%) dla zmierzonych promieni HBT ( $R_{out}, R_{side}, R_{long}$ ) dla źródeł identycznych pionów dla BES w funkcji centralności zderzenia, masy poprzecznej cząstek, a także względem płaszczyzny reakcji. Oszacowano również „ekscentryczność” oddziaływania Au+Au w funkcji energii zderzenia (patrz Rys. 4.13 w rozdz. 4.2.4.2).

Rozdział czwarty zawiera matematyczny opis formalizmu femtoskopowych korelacji z uwzględnieniem efektów kwantowej statystyki i wpływu oddziaływań w stanie końcowych. W tym rozdziale omawiana jest gaussowska parametryzacja funkcji korelacji, przedstawiono również metodę pomiarów korelacji w różnych układach współrzędnych. Omówiono także pomiar korelacji względem orientacji płaszczyzny przypadku czyli w funkcji azymutalnego kąta. Rozdział piąty opisuje eksperymenty STAR przy akceleratorze RHIC, ALICE przy LHC, NA61/SHINE przy SPS, oraz planowane eksperymenty CBM przy akceleratorze FAIR i MPD przy akceleratorze NICA. Rozdział szósty jest poświęcony technicznemu aspektowi wyznaczania femtoskopowych korelacji. Dużo miejsca poświęcono na opis eksperymentalnych trudności przy opisie wpływu efektów „tła niefemtoskopowego” (normalizacji korelacyjnej funkcji), w tym efektów związanych ze skończoną rozdzielczością pomiarową. Rozdział siódmy poświęcony jest modelom teoretycznym. Rozdział ten zawiera szereg przykładów femtoskopowych korelacji uzyskanych w ramach modeli UrQMD, EPOS, THERMINATOR. W szczególności przedstawiono rezultaty uzyskane przy pomocy modelu EPOS, opublikowane w sprawozdaniu konferencyjnym **EPJ Web Conf. 164 (2017) 07013** przygotowanym przez Habilitantkę, dla rozkładów  $p_T$  oraz promieni HBT dla oddziaływań Au+Au przy energiach  $\sqrt{s_{NN}} = 11.5, 19.6$  i 39 GeV. Przewidywania dla parametrów HBT uzyskanych przy pomocy modelu THERMINATOR dla oddziaływań Au+Au przy różnych energiach BES zostały przedstawione w sprawozdaniu konferencyjnym **Acta Phys. Polon. Supp. 9 (2016) 193**. W ostatnim rozdziale przedstawiono podsumowanie, wnioski i perspektywy dalszego rozwoju pomiarów femtoskopowych.

Uważam, że przedstawiona monografia jest dobrym wstępem do femtoskopowych korelacji w oddziaływaniach relatywistycznych ciężkich jonów, równocześnie prezentuje wkład Habilitantki. W tekście napotkałem niedociągnięcia edytorskie, wymagające poprawy, jednak nie umniejszają w znacznym stopniu walorów merytorycznych przedstawionej rozprawy. W rozdziale drugim zabrakło mi dyskusji o kondensacie kwarkowo-gluonowy przy omawianiu zjawiska spontanicznego łamania symetrii chiralnej. Z kolei w rozdziale ósmym, interesujące byłoby nawiązanie do przewidywań dla femtoskopowych pomiarów przy energiach akceleratora Future Circular Collider (FCC). Pomimo tych drobnych uwag, należy pochwalić Habilitantkę za całościowy opis tematyki i przygotowanie monografii w języku polskim.

Podsumowując, uważam, że przedłożona monografia i lista publikacji, w których habilitantka wniosła znaczny sumaryczny wkład, jest ważnym osiągnięciem. Zgodnie z załączonym autorefereatem Habilitantka w w/w publikacjach pracowała nad analizą danych (wyznaczeniem

korelacyjnej funkcji z uwzględnieniem „oddziaływań resztkowych”), była członkiem komitetów odpowiedzialnych za redagowanie tekstu publikacji oraz brała udział w dyskusji wyników fizycznych. Według bazy Web of Science (29 marca 2019 r.), na całokształt badań naukowych dr inż. Hanny Zbroszczyk składa się **483** publikacji z całkowitą liczbą cytowań około 24000, a indeks Hirscha = 79. Publikacje, które dr inż. Hanna Zbroszczyk przedstawiła jako osiągnięcie naukowe w przewodzie habilitacyjnym były cytowane 109 razy. O istotnej aktywności naukowej Habilitantki świadczy również uczestnictwo w realizacji 10 projektów badawczych. Na wyróżnienie zasługuje udział w projekcie NCN pt. „Utworzenie Centrum Femtoskopii na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej” w roli kierownika projektu.

Na podkreślenie zasługuje znacząca lista (30) referatów wygłoszonych przez Habilitantkę po obronie pracy doktorskiej. Dr inż. Hanna Zbroszczyk prezentowała wyniki femtoskopowych pomiarów na międzynarodowych i krajowych konferencjach. Brała również udział w organizacji konferencji i spotkań naukowych. Po obronie pracy doktorskiej wielokrotnie wyjeżdżała na krótkie pobyty w ramach współpracy do laboratorium BNL oraz SUBATECH.

Pani dr inż. Hanna Zbroszczyk posiada bogatą listę osiągnięć dydaktycznych. Prowadziła szereg wykładów z fizyki i informatyki, oraz ćwiczeń w ramach pracy na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej. Wypromowała 14/11 studentów studiów 1/2 stopnia. Sprawowała opiekę nad 10 praktykantami oraz 8 doktorantami, w tym 3 razy w roli promotora pomocniczego. Aktywnie też uczestniczyła w popularyzacji nauki.

Podsumowując, stwierdzam, że dorobek naukowy dr Hanny Zbroszczyk spełnia wymogi ustawy do uzyskania stopnia doktora habilitowanego i **wnioskuję o dopuszczenie jej do dalszych etapów postępowania habilitacyjnego.**

*Adam Trzypał*