

**Autoreferat**

**Dr inż. Hanna Paulina Zbroszczyk**

## **Autoreferat**

**Dr inż. Hanna Paulina Zbroszczyk**

### **Spis treści:**

|  |    |
|--|----|
| I Dane osobowe .....   | 3  |
| II Posiadane dyplomy i stopnie naukowego.....  | 3  |
| III Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.....  | 3  |
| IV Wskazane osiągnięcia.....   | 3  |
| V Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych.....  | 33 |
| A) Wskaźniki .....   | 33 |
| B) Publikacje naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JRC) .....   | 33 |
| C) Wygłoszenie referatów na międzynarodowych i krajowych konferencjach tematycznych.....   | 35 |
| D) Kierowanie międzynarodowymi i krajowymi projektami badawczymi oraz udział w takich projektach.....  | 39 |
| E) Nagrody i wyróżnienia.....  | 39 |
| F) Staże w zagranicznych i krajowych ośrodkach naukowych lub akademickich.....   | 40 |
| G) Członkostwo w międzynarodowych i krajowych organizacjach, towarzystwach naukowych oraz udział w konsorcjach i sieciach badawczych.....                  | 40 |
| H) Uczestnictwo w programach europejskich oraz innych programach międzynarodowych i krajowych w ramach działalności popularyzatorskiej i dydaktycznej..... | 41 |
| I) Udział w komitetach organizacyjnych międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych.....   | 41 |
| J) Aktywny udział w międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych z zakresu popularyzacji nauki.....  | 41 |
| K) Udział w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism oraz recenzowanie publikacji w czasopismach.....  | 42 |
| L) Osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji nauki.....   | 43 |
| M) Opieka naukowa nad studentami .....   | 44 |
| N) Inne osiągnięcia .....  | 46 |

## I Dane osobowe

**dr inż. Hanna Paulina Zbroszczyk (z domu Gos)**

## II Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

- Stopień naukowy **doktora nauk fizycznych** nadany 26 czerwca 2008 r. przez Radę Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej oraz 12 czerwca 2008 r. przez jury Université de Nantes.

Tytuł rozprawy doktorskiej: „**Studies of baryon-baryon correlations in relativistic nuclear collisions registered at the STAR experiment**”, obrona: 12.06.2008 r. (Nantes, Francja)

Promotor: prof. dr hab. Jan Pluta, prof. dr hab. Barbara Erazmus

Recenzenci: prof. dr hab. Zbigniew Majka, prof. dr hab. Philippe Crochet.

- Tytuł zawodowy **magistra inżyniera nauk fizycznych** uzyskany 14 czerwca 2004 r. na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej.

Tytuł pracy magisterskiej: „**Rezultatu eksperymentu STAR w zastosowaniu do analizy hadronów w eksperymencie ALICE**”, obrona: 14.06.2004 r. (Warszawa)

Promotor: prof. dr hab. Jan Pluta

Recenzent: dr Tomasz Pawlak

## III Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych:

- 15.07.2008 – do chwili obecnej - pracownik naukowo-dydaktyczny Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej na stanowisku **adiunkta** w Zakładzie Fizyki Jądrowej
- 01.10-2004 – 26.06.2008 – **doktorantka** Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej w Zakładzie Fizyki Jądrowej
- 01.10.2004 – 12.06.2008 – **doktorantka** w laboratorium SUBATECH – Nantes (Francja)

## IV Wskazanie osiągnięcia\* wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003

r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki

(Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.):

**Monografia: „Eksperymentalne aspekty badania korelacji femtoskopowych w zderzeniach relatywistycznych ciężkich jonów”** - Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, ISSN 1643-6857, ISBN 978-83-7814-845-6, **Warszawa, 2018 r.**

## Opis osiągnięć naukowych, stanowiących podstawę postępowanie habilitacyjnego

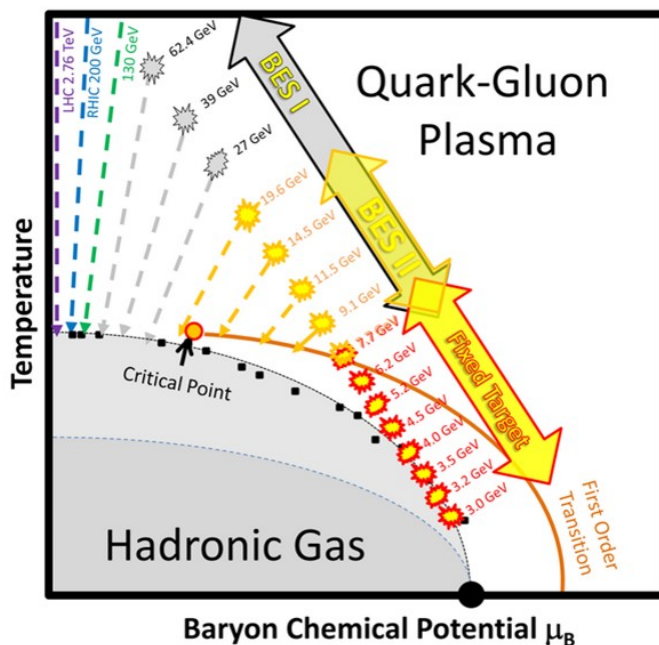
Rezultaty trzech dekad badania reakcji relatywistycznych ciężkich jonów, a w szczególności dekada związana z wykorzystaniem zderzacza RHIC (Relativistic Heavy-Ion Collider) w BNL (Brookhaven National Laboratory), doprowadziły do uzyskania ważnych informacji doświadczalnych dotyczących własności nowego stanu materii, w którym uwolnione zostały kwarkowe stopnie swobody. Uzyskane wyniki nie potwierdziły jednak wielu wcześniejszych przewidywań teoretycznych, odnoszących się do istotnych cech przejścia fazowego pomiędzy materią hadronową, a materią kwarkową. Okazało się, że charakterystyczne cechy tego przejścia przy energiach RHIC odpowiadają przejściu ciągłemu („cross – over”), zaś wytworzona materia nie wykazuje spodziewanych własności gazu, lecz raczej bliska jest własnościom idealnej cieczy. Oczekiwane zwiększenie czasowo-przestrzennych rozmiarów obszaru emisji hadronów, wynikające z wytworzenia stanu plazmy kwarkowo-gluonowej, nie zostało zaobserwowane, a zależności wyznaczonych rozmiarów od pędów emitowanych hadronów okazały się niespójne z wynikami obliczeń hydrodynamicznych, opisujących poprawnie inne charakterystyki badanych procesów. Efekt ten, nazwany „RHIC HBT puzzle”, przez długi czas pozostawał zagadką, zaś jego wyjaśnienie dostarczyło wielu informacji pozwalających głębiej zrozumieć istotę badanych zjawisk. Okazało się również, że najciekawszy obszar diagramu fazowego QCD nie leży w zakresie najwyższych energii, które zostały osiągnięte z pomocą zderzacza LHC w CERN, ale w obszarze energii niższych, możliwych do osiągnięcia z pomocą zderzacza RHIC w BNL oraz akceleratora SPS w CERN.

Program eksperymentu STAR, dotyczący badania zderzeń ciężkich jonów w funkcji energii zderzenia, „Beam Energy Scan (BES), należy aktualnie do najważniejszych programów badawczych zderzacza RHIC. Jest to także jeden ze wzbudzających największe zainteresowanie programów badawczych w dziedzinie relatywistycznej fizyki jądrowej. Sztandarowym celem naukowym programu BES jest, najogólniej mówiąc, eksploracja diagramu fazowego QCD, a bardziej szczegółowo - lokalizacja punktu krytycznego (critical point) na diagramie fazowym oraz wyznaczenie obszaru energii zderzenia, przy których następuje uwolnienie kwarkowych stopni swobody (onset of deconfinement). Wyniki tych badań mają też bezpośrednie odniesienie do zrozumienia pierwszych chwil ewolucji Wszechświata, tuż po Wielkim Wybuchu, kiedy istniał stan plazmy kwarkowo-gluonowej.

Jedną z eksperymentalnych metod badania zderzeń relatywistycznych ciężkich jonów (i nie tylko ciężkich jonów) jest femtoskopia korelacyjna. Głównym celem tej metody jest pomiar

czasowo-przestrzennych rozmiarów obszaru, z którego emitowane są cząstki w badanych zderzeniach oraz analiza związku tych rozmiarów z innymi charakterystykami reakcji. Należy zaznaczyć, że chodzi tu o rozmiary przestrzenne rzędu  $1\text{fm} = 10^{-15}\text{ m}$  i czasowe rzędu  $10^{-23}\text{ s}$ , a więc wartości kompletnie niemierzalne jakimikolwiek metodami bezpośrednimi. Okazuje się jednak, że korelacje cząstek w kinematycznym obszarze ich małych prędkości względnych niosą w sobie informacje o rozmiarach obszaru, z którego cząstki te są emitowane. Femtoskopia korelacyjna - to metoda pozwalająca na wydobycie tych informacji poprzez specyficzną analizę danych doświadczalnych. Za korelacje cząstek w tym obszarze kinematycznym odpowiedzialne są głównie efekty statystyk kwantowych i oddziaływania w stanie końcowym. Zarówno wielkość jak i forma tych efektów zależne są od czasowo-przestrzennych charakterystyk procesu emisji. Wykorzystanie korelacji cząstek do badania rozmiarów obszaru ich emisji ma swą pierwotną analogię w pomiarach rozmiarów kątowych gwiazd i początkowo zwane było metodą HBT od nazwisk autorów tej metody w astronomii (R. Hanbury-Brown, R.Q. Twiss), zaproponowanej w latach pięćdziesiątych ubiegłego wieku. Pierwsze obserwacje efektów statystyki kwantowej Bosego-Einsteina w rozkładach kątowych par mezonów  $\pi$  emitowanych w procesach anihilacji antyprotonów zostały opublikowane w 1960 roku a zaobserwowany efekt otrzymał nazwę GGLP od nazwisk autorów (G. Goldhaber, S. Goldhaber, W. Lee, A. Pais). Podstawy teoretyczne umożliwiające doświadczalne wyznaczenie rozmiarów obszaru emisji cząstek w zderzeniach hadronów i jąder zostały sformułowane w początkach lat 70-tych ubiegłego wieku przez Kopyłowa i Podgoreckiego. Początkowo w opisie korelacji wykorzystywano jedynie efekty statystyki kwantowej Bosego-Einsteina, bowiem badano korelacje identycznych pionów. Zasadniczym elementem tej metody jest pomiar korelacji cząstek w funkcji ich pędu względnego. W przypadku identycznych bozonów obserwuje się dodatnią korelację dla obszaru małych pędów względnych. Szerokość tego obszaru jest odwrotnie proporcjonalna do wielkości rozmiaru emisji cząstek. Oprócz efektów statystyki kwantowej, korelacje mogą być rezultatem oddziaływania w stanie końcowym: kulombowskiego (dla cząstek naładowanych) i silnego (dla hadronów). Wszystkie te efekty są wykorzystywane w analizie femtoskopowej. Wyniki uzyskane dla par identycznych pionów były jednym z ważnych elementów analizy zderzeń ciężkich jonów w eksperymentach na akceleratorach SPS (Super Proton Synchrotron) w CERN oraz RHIC w BNL. Analiza femtoskopowa wykazała szereg interesujących zależności. Wymieńmy kilka z nich dla przykładu. Po pierwsze - wielkość obszaru emisji wzrasta liniowo z krotnością cząstek produkowanych w zderzeniu, co sugerowało, że proces emisji zachodzi przy stałej gęstości cząstek. Rozmiary obszaru emisji w kierunku poprzecznym do osi wiązki maleją ze wzrostem pędu poprzecznego pary cząstek. Zależność taka była przewidywana w modelach hydrodynamicznych jako efekt relacji pomiędzy charakterystykami przestrzennymi i

pędowymi cząstkami emitowanymi w procesie reakcji ciężkich jonów. Wiąże się to również z faktem, że pomiary femtoskopowe dostarczają informacji nie o rozmiarach całego obszaru emisji, ale o innej wielkości, która z języku analiz korelacyjnych nosi nazwę „rozmiaru jednorodności” („homogeneity length”). Zaobserwowanie tej relacji było jednym z ważnych dowodów, że materia produkowana w zderzeniach ciężkich jonów zachowuje się kolektywnie.



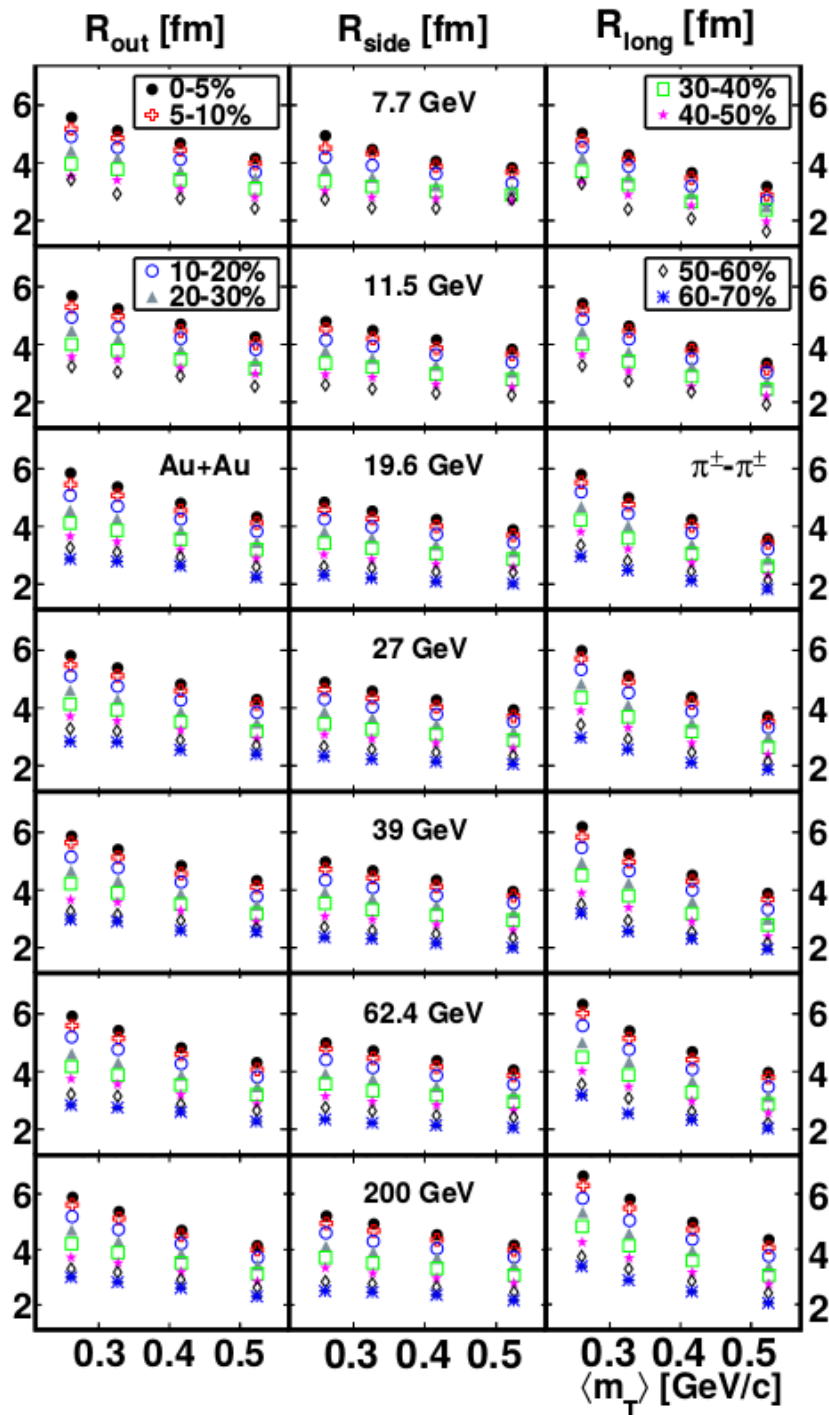
Rys. 1. Diagram fazowy chromodynamiki kwantowej (QCD).

Wyszczególniony opis osiągnięć został też wyszczególniony w odrębnym dokumencie: „Wykaz dorobku”.

### A) Femtoskopia korelacyjna identycznych pionów w zależności od energii zderzenia jonów złota eksperymencie STAR.

Program Beam Energy Scan (BES)- rys. 1, realizowany na zderzaczu RHIC rozpoczął się w 2010 roku ma trzy cele badawcze:

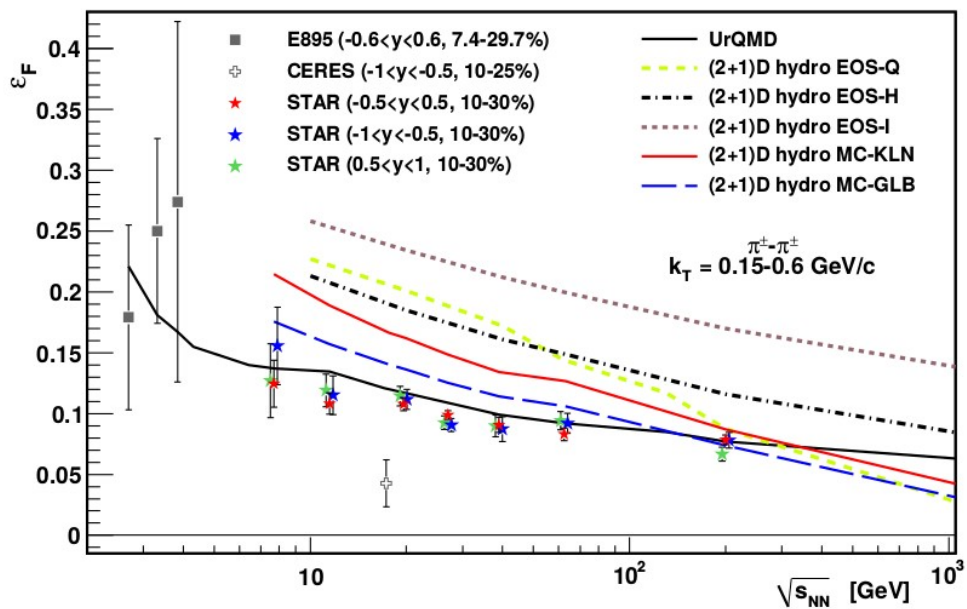
1. Znalezienie wartości granicznej energii poniżej której nie jest rejestrowane przejście materii hadronowej do stanu plazmy kwarkowo-gluonowej.
2. Badanie granicy przejścia fazowego pierwszego rodzaju pomiędzy materią hadronową, a kwarkową
3. Zlokalizowanie oraz zbadanie własności hipotetycznego punktu krytycznego (ang. Critical Point - CP) pomiędzy przejściem fazowym I rodzaju, a przejściem typu „cross-over”, pomiędzy fazą gazu hadronowego, a plazmy kwarkowo-gluonowej.



Rys. 2. Wyniki femtoskopowe identycznych pionów (rozmiary źródeł w funkcji masy poprzecznej dla różnych energii zderzenia) w programie BES eksperymentu STAR.

Program eksploracji diagramu fazowego składa się z serii zderzeń jonów złota Au przy różnych energiach zderzenia w układzie środka masy  $\sqrt{s_{NN}}$ . Program BES realizowany m. in. przez eksperyment STAR umożliwia wyznaczenie wszystkich obserwabli w identycznych warunkach

eksperymentalnych (z tym samym detektorem). BES jest jednym ze sztanarowych programów badawczych realizowanych na zderzaczu RHIC, dotychczas została zakończona jego pierwsza faza (BES-I), w ramach które zostały zebrane dane dla zderzeń jonów złota przy energiach  $\sqrt{s_{NN}} = 7,7; 11,5; 17,3; 27; 39; 62,4$  GeV . Dane dla branej pierwotnie pod uwagę energii zderzenia  $\sqrt{s_{NN}} = 5,5$  GeV nie zostały zebrane ze względu na ograniczenia pomiarowe RHIC'a, który pierwotnie był dedykowany (i optymalizowany) do pracy przy energii zderzenia  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV. Obecnie planowana jest druga faza programu BES-II (lata: 2019 – 2020, rozważane energie zostały umieszczone na rys. 1), kiedy zostanie zebrane jeszcze więcej potrzebnych danych. Kolaboracja eksperymentu STAR uruchomiła także możliwość zbierania danych w systemie stacjonarnej tarczy, co daje możliwość zmniejszenia energii zderzenia w układzie środka masy do  $\sqrt{s_{NN}} = 3$  GeV i badania obszaru diagramu fazowego o wartości  $\mu_B = 721$  MeV. Całe spektrum energetyczne programu „Fixed target” wynosi od  $\sqrt{s_{NN}} = 3$  GeV do ok.  $\sqrt{s_{NN}} = 7,7$  GeV. Jak do tej pory zostały zebrane niewielkie próbki pomiarowe w trybie eksperymentu ze stacjonarną tarczą.



**Rys. 3. Zależność parametru ekscentryczności od energii zderzenia.**

Program BES ma na celu eksplorację wspomnianego wcześniej obszaru diagramu fazowego i jest obecnie w fazie realizacji. Eksperyment STAR, biorący także udział w programie BES ma unikalną okazję do przeprowadzenia pomiarów dla różnych energii zderzenia z wykorzystaniem tego samego kompleksu detektorowego, co uniezależnia od wszelkich niepewności pomiarowych wynikających z porównania wyników uzyskanych przy użyciu zupełnie innej aparatury. Wszelkie wyniki [1], m.in. te dotyczące femtoskopowych rozmiarów źródeł mogą zostać bezpośrednio



porównane z wynikami dla wyższych energii. Jednymi z pierwszych wyników są wyniki korelacji dwucząstkowych dla układów identycznych pionów. Rys. 2 przedstawia zależność oszacowanych rozmiarów  $R_{out}$ ,  $R_{side}$  oraz  $R_{long}$  (wartości rozmiarów promieni femtoskopowych w trzech różnych kierunkach: *long* – zdeterminowanym kierunkiem wiązki, *out* – zdeterminowanym kierunkiem całkowitego pędu pary w płaszczyźnie poprzecznej oraz *side* – prostopadłym do obu poprzednich kierunków) dla sześciu przedziałów centralności oraz siedmiu energii zderzenia jonów złota w funkcji średniej masy poprzecznej pary. Dla każdego z trzech rozmiarów źródła obserwowane jest zmniejszanie ich wartości wraz ze zwiększaniem średniej masy poprzecznej. Zjawisko to jest konsekwencją występowania poprzecznego (w kierunku *out* oraz *side*) oraz podłużnego (w kierunku *long*) przepływu kolektywnego. Widoczne jest także zwiększanie rozmiaru źródła dla coraz bardziej centralnych zderzeń (promienie HBT są najmniejsze dla zderzeń peryferyjnych: 60 – 70%). Zderzenia centralne to takie, dla których stopień przekrycia się zderzanych jąder jest największy, a zderzenia peryferyjne to takie, gdzie liczba partycypantów zderzenia jest najmniejsza. Klasy centralności definiowane są także w zależności od procentu całkowitego przekroju czynnego na reakcję zderzenia. Jest to naturalny efekt występowania najmniejszego źródła emisji pionów dla zderzeń peryferyjnych oraz zwiększania jego rozmiaru dla zderzeń coraz bardziej centralnych. Duże rozmiary źródła oraz / i długi czas życia były sugerowane jako potencjalne sygnatury rejestracji plazmy kwarkowo-gluonowej. Wzrost ok. 10% wartości poprzecznych promieni  $R_{out}$ ,  $R_{side}$  został zaobserwowany. Celem wnikliwej i szczegółowej analizy femtoskopowej identycznych mezonów  $\pi$  jest znalezienie związku pomiędzy rodzajem przejścia fazowego między materią hadronową, a kwarkową, a kształtem ewoluującego źródła emisji cząstek w trakcie jego kinetycznego wymrożenia. Jak wiadomo, w przypadku niecentralnych zderzeń ciężkich jonów obszar nukleonów biorących bezpośredni udział w zderzeniu (czyli uczestników zderzenia) jest początkowo kształtu migdałka, który ulega ewolucji czasowo-przestrzennej i ekspanduje znacznie bardziej w płaszczyźnie reakcji zderzenia niż w płaszczyźnie do niej prostopadłej. Z tego powodu ewolucja czasoprzestrzenna źródła jest najbardziej obserwowalna w płaszczyźnie zderzenia. W związku z początkowym, anizotropowym kształtem źródła oraz zmianami  $\partial p/\partial e$ , (gdzie:  $p$  jest ciśnieniem, natomiast  $e$  jest gęstością energii), taki przebieg ewolucji jest konsekwencją największego gradientu ciśnienia w płaszczyźnie reakcji, co bezpośrednio przekłada się na rozmiary źródła emisji w oraz poza płaszczyznę reakcji. Także dłuższe czasy życia systemów przyczyniają się do większej ewolucji system w płaszczyźnie reakcji, niż poza nią. Poza tym spodziewane jest, że w miarę wzrostu energii zderzenia wydłużą się czasy życia systemu, jak również wzrosną wartości gradientów ciśnień w płaszczyźnie reakcji. Modele hydrodynamiczne przewidują monotoniczne zależności tych wielkości w miarę zmian energii zderzenia. Na rys. 3

przedstawione zostały zależności parametru zwanego ekscentrycznością, niosącego informację dotyczącą kierunku ekspansji systemu. Z uzyskanych wyników widać, że następuje szybsza ewolucja w kierunku płaszczyzny reakcji, niż w kierunku do niego prostopadłym. Wyniki eksperymentalne są zgodne z przewidywaniami modelu UrQMD, tym samym pokazują iż wielkość ta nie jest czuła na przejście fazowe. Jest jeszcze jeden aspekt związany z równaniem stanu, w związku iż przejście fazowe jest dla pewnego zakresu energetycznego przejściem typu „cross-over” (wyższe energie zderzenia), a dla niższych energii przejściem fazowym pierwszego rodzaju, dla pewnej energii zderzenia spodziewane jest wystąpienie fazy „mieszanej” lub hipotetycznego, jak dotąd punktu krytycznego pomiędzy tymi dwoma przejściami.

Osobisty wkład w rozwój omówionych badań dotyczył dyskusji wyników oraz redagowania tekstu publikacji w roli przewodniczącej Komitetu (Chairperson of God-Parent Committee) pracującego nad tekstem publikacji w eksperymencie STAR.

## **B) Pomiary femtoskopowe układów złożonych z protonów oraz antyprotonów**

Wyniki uzyskane w eksperymencie STAR (RHIC) [2] dla energii zderzeń jonów złota  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV stanowią istotny wkład w femtoskopowe badania zderzeń ciężkich jonów. Korelacje barion-barion idealnie uzupełniają informacje uzyskane z korelacji mezon-mezon, jak i z mezon-barion. Korelacje barionów mogą być badane w układach cząstek identycznych (proton-proton, antyproton-antyproton, lambda-lambda, antylambda-antylambda) jak i w układach cząstek nieidentycznych o równym masach (proton-antyproton), jak i różnych masach (proton-antylambda). Porównanie wyników dla różnych typów hadronów stanowi kompletny obraz zależności femtoskopowych - jako, że produkowane wskutek ciężkojonowego zderzenia są nie tylko piony, lecz także kaony, protony oraz wiele cięższych hadronów ulegających rozpadom wskutek ewolucji czasoprzestrzennej systemu. Większa masa barionów w porównaniu z najliczniej produkowanymi mezonami  $\pi$  oraz K sprawia, że korelacje barionów eksplorują taki fragment źródła emisji, jaki nie jest dostępny dla innych hadronów. Termiczne ruchy kolektywne cząstek w stanie równowagi sprawiają, że cząstki produkowane są z niższymi średnimi prędkościami względem lżejszych pionów i kaonów. Z drugiej strony, kolektywne ruchy cząstek porównane ze sobą dostarczają kompletnej informacji o przepływach cząstek w systemie. W rezultacie, ostateczny rozkład parametrów czasowo-przestrzennych dla wymrożenia uzyskany metodami femtoskopowymi odzwierciedla relacje między ruchami termicznymi całościowego systemu. Informacje te są uzyskiwane metodami femtoskopowymi uwzględniającymi korelacje pędowe układu dwóch cząstek. Z relacji pomiędzy ruchami termicznymi i kolektywnymi, pomiędzy chemicznym i termicznym wymrożeniem, z uwzględnieniem skutków produkcji i rozpadów krótkożyjących

rezonansów, wtórnym rozpraszaniem - ostateczny obraz ewolucji czasoprzestrzennej systemu opisuje bardzo złożone zjawiska, trudne do ilościowego opisu. Ich spójny opis wyraźnie potrzebuje informacji pochodzących zarówno z analizy cząstek lekkich (piony) i cięższych (protony).

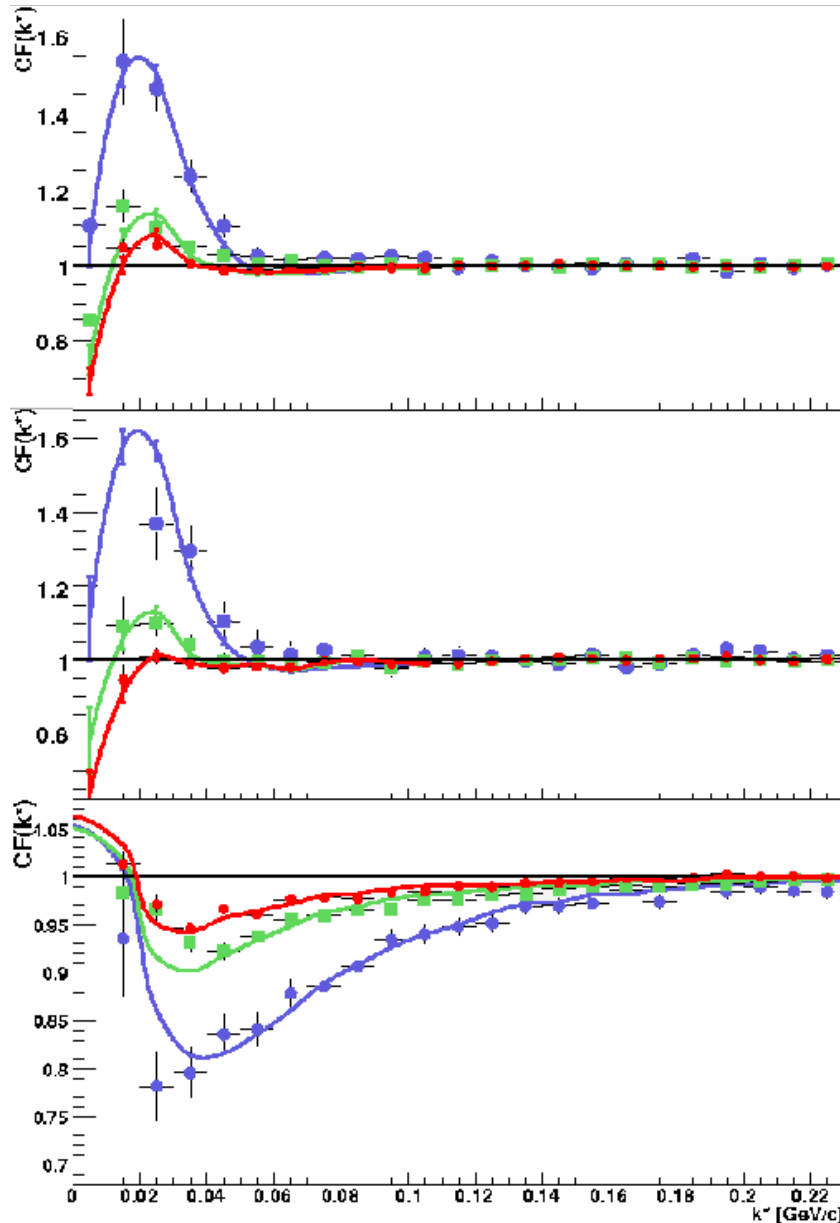
Konkluzje wynikające z analizy femtoskopowej barionów:

- Zmierzone wartości rozmiarów obszarów emisji protonów i antyprotonów są systematycznie mniejsze niż te uzyskane w femtoskopowych analizach lżejszych cząstek: pionów i kaonów w podobnych przedziałach pędowych (podobne wartości  $k_T$  -sumaryczny pęd pary cząstek). Zjawisko to tłumaczone w myśl koncepcji hydrodynamicznej poprzez relację między termalnymi, a kolektywnymi ruchami materii. Pary cząstek o mniejszych masach są produkowane statystycznie z obszarów położonych bliżej środka systemu lub / i później w porównaniu do cząstek cięższych.
- Wzrost zmierzonych rozmiarów źródeł w miarę wzrostu centralności zderzenia - odzwierciedla geometrię zderzenia. Uzyskane zależności - relacji rozmiaru źródła w funkcji centralności zderzenia są podobne jak te uzyskane dla lżejszych cząstek.
- Rozmiary źródeł emisji zależą od energii zderzenia ciężkojonowego - dla wyższych energii zderzenia produkowane jest większe źródło, co jest odzwierciedlone w słabszej korelacji cząstek pochodzących z większego obszaru.
- Eksperymentalne wyniki potwierdzają przewidywania różnych modeli teoretycznych.
- Wskutek dużych krotności barionów produkowanych także w niższych energiach zderzenia (program BES) - niższe energie zderzenia otwierają nowe możliwości studiowania femtoskopowych korelacji barionów. Jest niezwykle istotne, aby zweryfikować, czy bariony w porównaniu do mezonów przedstawiają podobne własności (poprzez analizy femtoskopowe, efektów kolektywnych wyznaczanych przez przepływ eliptyczny  $v_2$ , itd). Analiza barionów może być z powodzeniem rozpatrywana zarówno przy dużych energiach zderzenia, jest natomiast ona niezwykle ciekawa przy niższych energiach zderzenia. Opisują one system przy wyższych gęstościach barionowych, dla których źródła emisji barionów oraz antybarionów mogą być inne. Studium podprogowej produkcji barionów, zwłaszcza tych cięższych, począwszy od hiperonu  $\Lambda^0$  wydaje się być interesujące. Informacje uzyskane z analizy mezonów i barionów stanowią komplementarny obraz ewoluującego systemu wyprodukowanego wskutek ciężkojonowego zderzenia, jako, że opisują obszar niezerowych gęstości barionowych na diagramie fazowym.

Na rys. 4 są wyniki dla femtoskopii proton-proton- (górny panel), antyproton-antyproton - (środkowy panel) i proton-antyproton- (dolny panel) dla danych eksperymentu STAR, dla energii zderzenia  $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$ .

Osobisty wkład w rozwój omówionych tu badań dotyczył analizy danych, dyskusji wyników oraz redagowania tekstu publikacji.

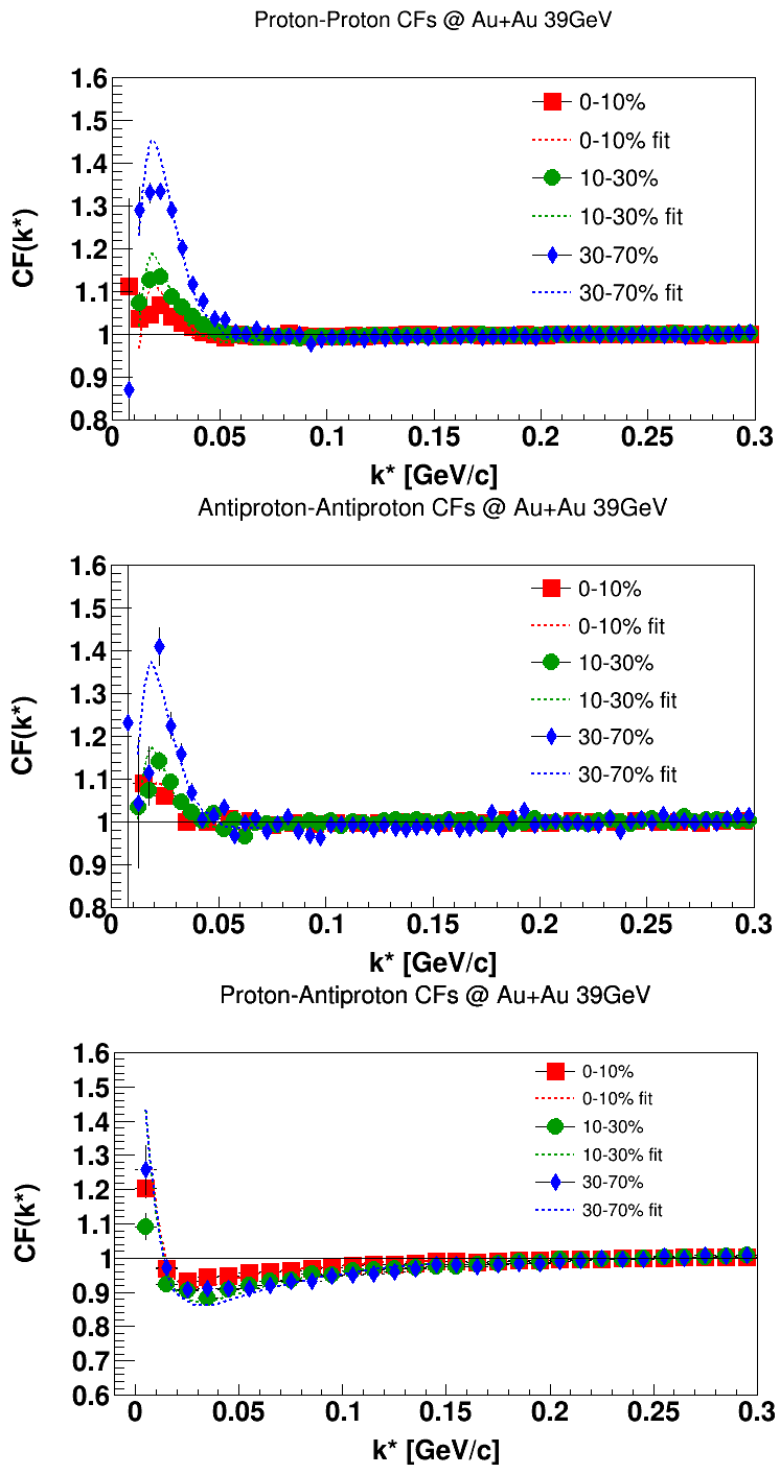
Rys. 5 przedstawia z kolei wyniki dla zderzeń Au–Au z programu BES – dla energii zderzenia  $\sqrt{s_{NN}} = 39$  GeV [3]. Zebrane zderzenia zostały analizowane w trzech przedziałach centralności: centralnych (0–10%), średniocentralnych (10–30%) oraz peryferyjnych (30 – 80%). Widoczny jest wpływ centralności zderzenia na wysokość i szerokość efektu korelacyjnego w funkcji korelacyjnej wskazujący iż dla najbardziej centralnych zderzeń zmierzone źródło jest największych rozmiarów (dla największego źródła obserwowany jest najslabszy efekt korelacyjny).



**Rys. 4. Wyniki femtoskopii protonów dla energii zderzenia  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV**

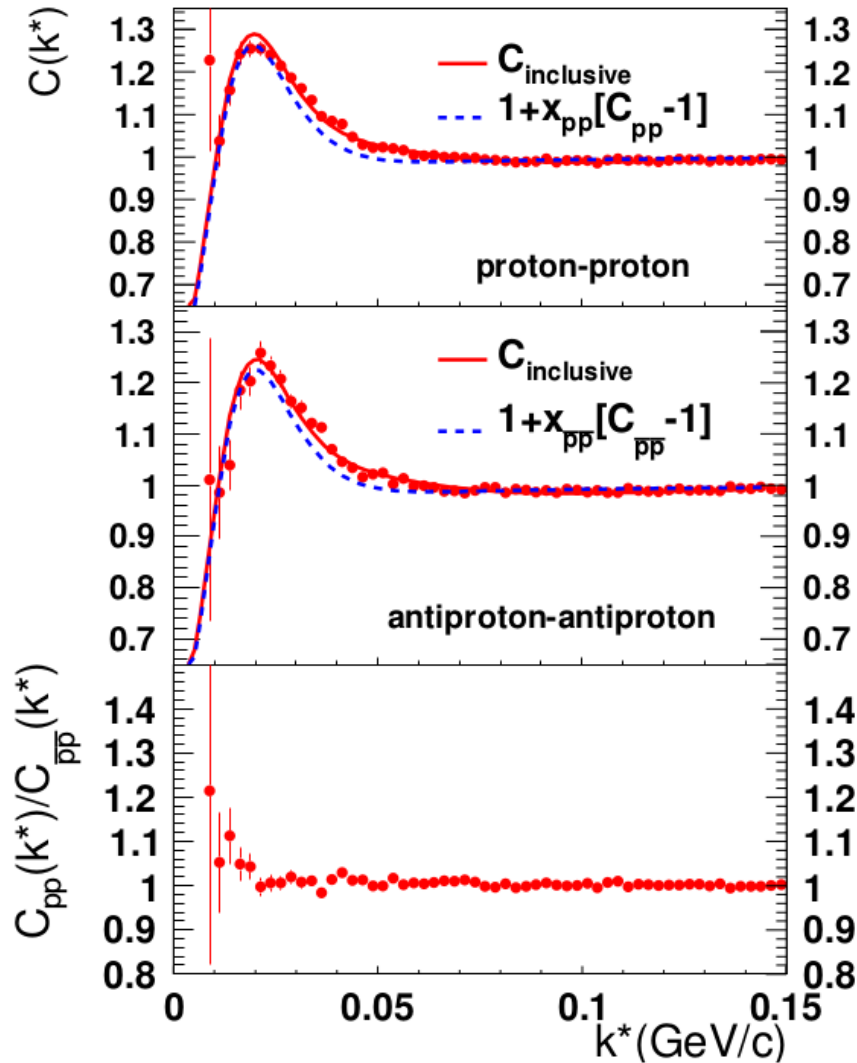
Wykresy przedstawiają zmierzone funkcje korelacyjne wraz z ich statystycznymi niepewnościami oraz dopasowaniami krzywych teoretycznych. Dane uwzględniają systematyczną korekcję na zanieczyszczenie innymi parami cząstek.

Osobisty wkład w rozwój omówionych tu badań dotyczył analizy danych (wyznaczenia funkcji korelacyjnych, dopasowania krzywych teoretycznych, analiza niepewności pomiarowych, korekcja zmierzonego sygnału eksperymentalnego) oraz dyskusji wyników.



Rys. 5. Wyniki femtoskopii protonów dla energii zderzenia  $\sqrt{s_{NN}} = 39$  GeV

Oddziaływanie pomiędzy dwoma antynukleonami to podstawowe oddziaływanie wiążące antynukleony w antyjadra, jak dotąd nie było ono szczegółowo badane. Femtoskopowe badania dwóch antyprotonów, najbardziej elementarnych przykładów antymaterialnych cząstek umożliwiają wyznaczenie parametrów oddziaływania silnego pomiędzy dwoma antynukleonami. Rys. 6 przedstawia funkcje korelacyjne układu proton-proton (górny panel) oraz antyproton-antyproton (środkowy panel). Dolny panel ilustruje stosunek funkcji korelacyjnych dla układu proton-proton o



**Rys. 6. Wyniki femtoskopii protonów i antyprotonów dla energii zderzenia  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV**

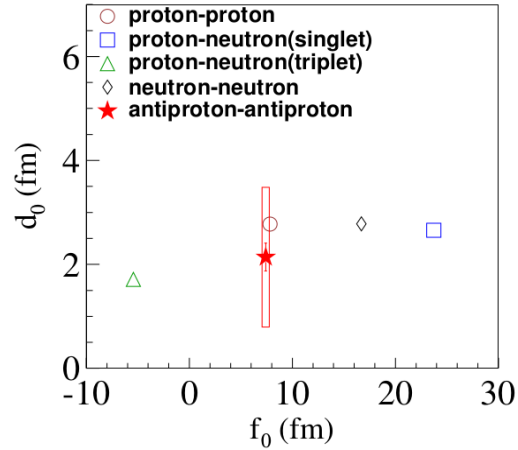
oraz antyproton-antyproton [4] wskazując, iż w granicy niepewności obie funkcje są ze sobą spójne. Zostały rozważone zderzenia jonów złota przy energii  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, dla centralności 30 – 80%.

Przedstawione wyniki uwzględniają korekcję zmierzonego sygnału korelacyjnego ze względu na korelacje szczątkowe pochodzące z kanału rozpadu hiperonu  $\Lambda$  w zastosowanej zależności:  $C_{\text{inclusive}} = 1 + x_{pp}[C_{pp}(k^*; R_{pp}) - 1] + x_{p\Lambda}[C_{p\Lambda}(k^*; R_{p\Lambda}) - 1] + x_{\Lambda\Lambda}[C_{\Lambda\Lambda}(k^*) - 1]$

Poszukiwana jest korelacja:  $C_{pp}(k^*; R_{pp})$ . Wielkości:  $x_{pp}$ ,  $x_{p\Lambda}$ ,  $x_{\Lambda\Lambda}$  są frakcjami zadanych par cząstek (zakładane jest, że suma wszystkich trzech frakcji wynosi 1),  $C_{pp}$ ,  $C_{p\Lambda}$ ,  $C_{\Lambda\Lambda}$  są funkcjami korelacyjnymi. Na wykresach, czerwonymi symbolami zostały zaznaczone punkty pomiarowe dla właściwych korelacji, teoretyczna funkcja opisująca korelację dwóch nukleonów (lub antynukleonów) została przedstawiona ciągłą, czerwoną linią. Wartość testu zgodności  $\chi^2$  po podzieleniu przez liczbę stopni swobody wynosi 1,66 dla układu proton–proton oraz 1,61 dla układu antyproton-antyproton. Funkcje korelacyjne zostały skorygowane ze względu na efekty związane z rozdzielczością detektora oraz z identyfikacją cząstek. Przedstawione niepewności są jedynie statystyczne. Wyniki uwzględniają też korekcję na szczytkowe korelacje pochodzące z rozpadu hiperonu  $\Lambda$  oraz  $\Lambda^+$ . Obie funkcje korelacyjne są ze sobą spójne, funkcja korelacyjna antyproton-antyproton ma podobny przebieg do funkcji korelacyjnej dwóch protonów. Dowodzi to, że oddziaływanie silne pomiędzy dwoma protonami jest porównywalne z oddziaływaniami silnymi pomiędzy dwoma antyprotonami. Zostały także opracowane parametry oddziaływania silnego  $d_0$  oraz  $f_0$  wskazujące iż oddziaływanie silne pomiędzy dwoma antyprotonami jest takie samo jak oddziaływanie silne pomiędzy dwoma protonami. Dla układu dwóch protonów wartość parametru  $f_0 = 7,41 \pm 0,19(\text{stat}) \pm 0,36(\text{syst})$  fm, natomiast parametr  $d_0 = 2,14 \pm 0,27(\text{stat}) \pm 1,31(\text{syst})$  fm, z kolei wartości średniego promienia źródła emisji wynoszą:  $R_{pp} = 2,75 \pm 0,01 \pm 0,04$  fm oraz  $R_{\bar{p}\bar{p}} = 2,80 \pm 0,02(\text{stat}) \pm 0,03(\text{syst})$  fm.

Rys. 7 zestawia parametry oddziaływania silnego dla różnych par cząstek. Głównym wnioskiem omawianej pracy jest spójność w opisie oddziaływania silnego pomiędzy dwoma nukleonami (najbardziej elementarne przykłady cząstek materialnych) oraz dwoma antynukleonami (najbardziej elementarnymi przykładami cząstek antymaterialnych).

Osobisty wkład w rozwój omówionych tu badań dotyczył analizy danych (wyznaczenie niepewności systematycznych), dyskusji wyników oraz redagowania tekstu publikacji w roli członka Komitetu odpowiedzialnego za przygotowanie tekstu publikacji.



**Rys. 7. Parametry oddziaływania silnego dla pary antynukleonów**

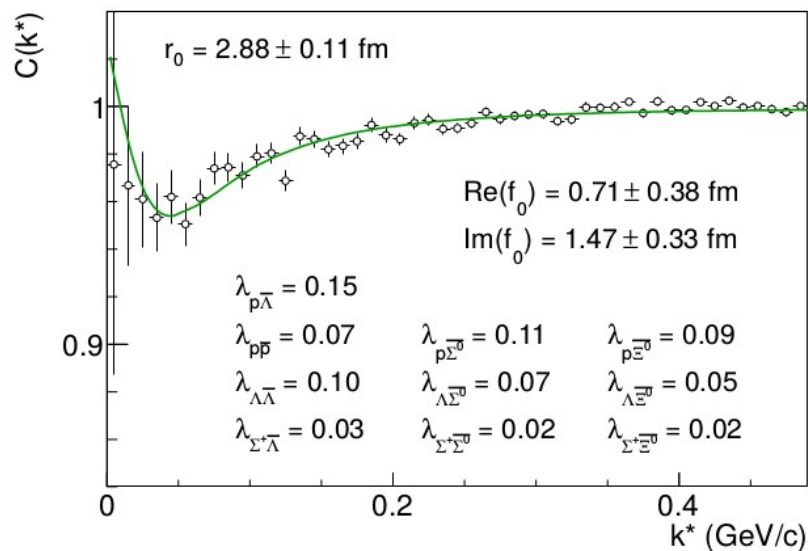
### C) Oddziaływania silne w femtoskopowych korelacjach proton-antylambda.

Silne efekty kolektywne występujące w systemie wyprodukowanym wskutek ciężkojonowego zderzenia przy ultrarelatywistycznych energiach (Au - Au zderzenie przy energii  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV) sprawiają, że cięższe cząstki są statystycznie emitowane z mniejszych geometrycznie obszarów. Z jednej strony potencjał oddziaływania silnego w parach proton-lambda oraz antyproton-antylambda są dobrze poznane, z drugiej strony oddziaływania między barionem, a antybarionem, jak w przypadku par proton-antylambda oraz antyproton-lambda zostały oszacowane po raz pierwszy przez kolaborację STAR [5]. Została wtedy zaobserwowana różnica w rozmiarach źródeł w zależności od tego, czy badany układ cząstek składał się z kombinacji dwóch (anty)barionów lub barionu i antybarionu. Rozmiar źródła emitującego pary proton-lambda oraz antyproton-antylambda jako  $r_0 = 3,09 \pm 0,30(\text{stat}) + 0,37 - 0,45$  (syst) fm, natomiast pary proton-antylambda oraz antyproton-lambda został oszacowany jako:  $r_0 = 1,50 \pm 0,05(\text{stat}) + 0,40 - 0,43$  (syst) fm. Zmierzone funkcje korelacyjne zostały skorygowane ze względu na czystość próbki (poprawnie zidentyfikowane protony i lambda) oraz efekty związane ze skończoną rozdzielczością detektora, nie został jednak uwzględniony wpływ szczątkowych korelacji. Korelacje szczątkowe, femtoskopowe korelacje pomiędzy cząstkami pochodzącymi z rozpadów słabych, które nie zostały zarejestrowane przez detektor jako produkty rozpadów, ale traktowane są jako cząstki pierwotne odgrywają tu kluczową rolę. Oddziaływanie silne w systemach dwubarionowych jest jednym z fundamentalnych problemów QCD, jest ono przedmiotem zainteresowań wielu eksperymentów. Oddziaływanie barion-antybarion, w odróżnieniu od oddziaływania barion-barion zawiera wkład z anihilacji materii z antimaterią. Jak dotąd, większość prac eksperymentalnych dotyczyła par proton-



antyproton, proton-antyneutron oraz antyproton-deuteron, przy czym dostępne są także przewidywania teoretyczne dla oddziaływań innych par barionów i antybarionów.

W pracy kolaboracji STAR została zaproponowana metoda, oparta na pomiarze korelacji femtoskopowych, szacująca parametry oddziaływania silnego: rzeczywistą i urojoną składową parametru długości rozpraszania  $f_0$  w parach barion-antybarion. Urojona składowa parametru  $f_0$  odzwierciedla anihilację par proton-antylambda. Oprócz parametrów oddziaływania silnego zostały oszacowane femtoskopowe rozmiary źródła emisji par protonów, lambda i ich antycząstek. Problem pomiaru korelacji rezydualnych został wspomniany w pracy, jednak efekt ten nie został uwzględniony podczas analizy. W pracy [6] wyniki kolaboracji STAR zostały przeanalizowane powtórnie pod kątem występowania w nich korelacji szczątkowych. Przekroje czynne na anihilacje barion-antybarion dla wszystkich przypadków par zostały oszacowane jako takie same, jak w przypadku par proton-antyproton. Wynik dopasowania jest pokazany na rys. 8. Otrzymany rozmiar źródła emisji par  $p - \Lambda^-$  oraz  $\bar{p} - \Lambda$  wynosi  $r_0 = 2,83 \pm 0,12$  fm, jest on większy od tego otrzymanego w pracy [5] wskazującym tym samym istotność uwzględnienia korelacji rezydualnych w analizie danych barionowych. Rozmiar ten jest spójny z rozmiarem źródła emisji par barion-barion oraz antybarion-antybarion oraz z przewidywaniami hydrodynamicznymi odnośnie skalowania rozmiaru emisji wraz ze wzrostem masy poprzecznej, potwierdzając tym samym słuszność przeprowadzonej procedury weryfikacji rozmiaru źródła emisji par barion-antybarion. Parametr oddziaływania silnego  $f_0$  wynosi natomiast  $f_0 = 0,49 \pm 0,21 + i(1,00 \pm 0,21)$  fm, potwierdzając tym samym, iż urojona wartość parametru  $f_0$  dla oddziaływania proton-antylambda jest spójna z oddziaływaniem proton-antyproton.



**Rys. 8. Skorygowana na efekt korelacji rezydualnych funkcja proton-antylambda pochodzącej ze zderzeń Au-Au dla najwyższej energii RHIC'a.**

Przyczyny występowania korelacji rezydualnych zostały omówione poniżej.

W eksperymentach przeprowadzanych na kolajderach, takich jak STAR na zderzaczu RHIC większość cząstki propagują radialnie z punktu emisji, położonego w centrum detektora do samego detektora. Barion powstały wskutek rozpadu słabego często porusza się po trajektorii podobnej do trajektorii cząstki, z jakiej rozpadu pochodzi. Ze względu na częsty brak możliwości rejestracji cząstki rozpadającej się (jeśli do rozpadu dochodzi przed komorą projekcji czasowej, przez co rejestrowane są jedynie produkty rozpadu), wiele cząstek zidentyfikowanych jako np. pierwotne protony faktycznie pochodzi z rozpadów słabych cięższych barionów. Ten mechanizm funkcjonuje w przypadku barionów, np. hiperonów  $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$ ,  $\Lambda^- \rightarrow \bar{p} + \pi^+$ , mezonów:  $K_0^S \rightarrow \pi^+ + \pi^-$  które nie są rejestrowane, zamiast tego detektor rekonstruuje ślady cząstek wtórnych jako ślady cząstek pierwotnych.

Oddziaływanie silne jest istotne w przypadku układów dwucząstkowych zaraz po ich emisji, w skali czasowej fm/c. Dla cząstek pochodzących z rozpadów słabych rozważana jest skala czasowa  $10^{-10}$  s, oddziaływanie silne w stanach końcowych dotyczy cząstek pierwotnych, nie pochodzących z rozpadów, a to te są identyfikowane w detektorach. W takim przypadku równanie opisujące funkcję korelacyjną musi być zmodyfikowane. Funkcja falowa układu dwucząstkowego musi uwzględniać nie produkty rozpadu, lecz cząstki pierwotne, dla których wyznaczane są wielkości  $k^*$  oraz  $r^*$  (względny pęd oraz odległość par w układzie spoczynkowym pary cząstek). Następnie uwzględniony zostaje proces rozpadu (jednej lub obu cząstek z rozważanej pary) i wartość  $k^*$  jest tym razem wyznaczana dla produktów rozpadów (cząstek, jakie są identyfikowalne przez detektor), a zmierzona funkcja korelacyjna jest korelacją szczątkową (*Residual Correlation, RC*). Przypadkowa natura rozpadów słabych sprawia, że mierzona eksperymentalnie funkcja korelacyjna cząstek pierwotnych jest rozmyta korelacjami rezydualnymi, zwłaszcza ma to miejsce w przypadku, kiedy pęd cząstki, dla którego następuje rozpad jest porównywalny z szerokością efektu korelacyjnego. Aby korelacje szczątkowe miały istotny wpływ na mierzoną korelację muszą być spełnione następujące warunki:

- efekt korelacyjny między cząstkami rodzicielskimi jest znaczący w porównaniu z efektem korelacyjnym cząstek pochodnych
- frakcja par szczątkowych jest istotna w porównaniu z frakcją par cząstek pierwotnych
- pęd cząstek wtórnych jest porównywalny z szerokością efektu korelacyjnego dla danej wartością  $k^*$

W przypadku par proton-antyproton i proton-antylambda wszystkie warunki są spełnione. W przypadku oddziaływania silnego par barion-antybarion znaczący wpływ ma proces anihilacji między cząstkami, a antycząstkami, który jest uwzględniony w parametryzacji funkcji korelacyjnej

jako część urojona parametru  $f_0$ . Anihilacja jest widoczna w funkcji korelacyjnej jako negatywna korelacja (poniżej jedności:  $C(k^*) < 1$ ), sięgająca nawet  $k^* = 300$  MeV/c.

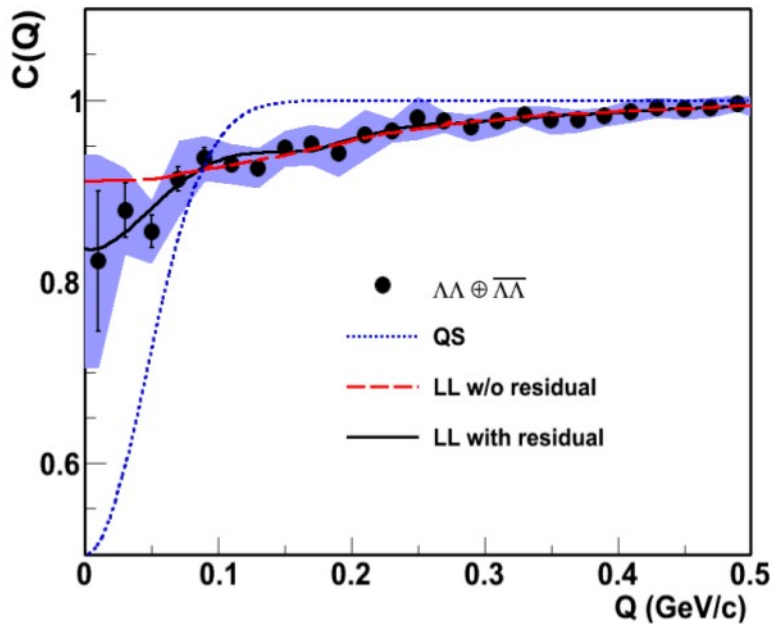
Kiedy wszystkie korelacje rezydualne zostaną wyznaczone należy wyznaczyć właściwą korelacją dla cząstek proton-antylambda.

Osobisty wkład w rozwój omówionych tu badań dotyczył analizy danych (wyznaczenia postaci funkcji korelacyjnej po zastosowaniu korekcji rezydualnej) oraz dyskusji wyników.

#### D) Korelacje lambda-lambda w zderzeniach Au+Au przy energii $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV

Wyznaczenie korelacji  $\Lambda - \Lambda$  jest istotne z co najmniej dwóch powodów:

- pierwszym z nich jest możliwość oszacowania parametrów oddziaływania silnego pomiędzy dwoma hiperonami  $\Lambda$ , co jest istotne z punktu widzenia zrozumienia równania stanu dla gwiazd neutronowych,
- drugim jest możliwość potencjalnej detekcji sześciokwarkowego stanu dwubarionowego H. Zgodnie z przewidywaniami QCD Jaffe oraz współpracowników możliwa produkcja tego stanu dwubarionowego byłaby poprzez kanał koalescencji dwóch hiperonów  $\Lambda$  lub  $\Lambda$  i  $\Xi$ .



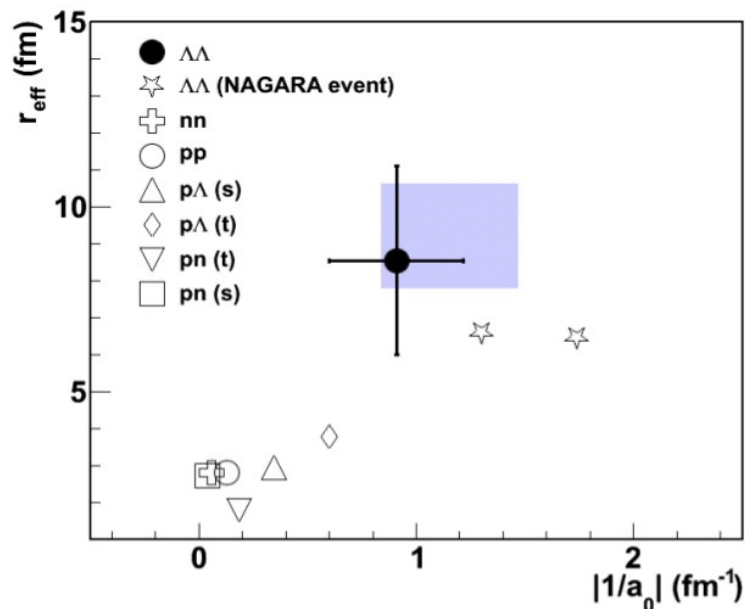
**Rys. 9. Funkcja korelacyjna  $\Lambda\Lambda \oplus \Lambda\bar{\Lambda}$  ze zderzeń Au-Au dla najwyższej energii RHIC'a.**

Na rys. 9 [7] widać połączoną funkcję korelacyjną ( $\Lambda\Lambda \oplus \Lambda\bar{\Lambda}$ ), zostały też pokazane przewidywania efektów statystyki kwantowej. Funkcja korelacyjna została wyznaczona dla wielkości  $Q$ , która jest względnym pędem pary cząstek. Z powyższego rysunku wynika, iż uwzględnienie efektu korelacji rezydualnych jest istotne z punktu widzenia wnioskowania o

parametrach oddziaływania silnego między (anty)hiperonami oraz parametrów przestrzennych ich źródła emisji. Procedura uwzględnienia korelacji rezydualnych w metodzie szacującej rozmiar źródła została uproszczona w stosunku do metody zastosowanej w systemie p- $\Lambda$ , a korelacje szczątkowe mogą pochodzić z kanałów rozpadów:  $\Sigma$  oraz  $\Xi$ . . Przedstawione zostały funkcje korelacyjne  $\Lambda - \Lambda$  oraz  $\Lambda - \bar{\Lambda}$  dla zderzenia Au - Au dla energii  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV dla centralności: 0 - 80%. Niepewności pomiarowe są jedynie statystyczne.

Parametry oddziaływania silnego (rys. 10) dla systemu  $\Lambda$ - $\Lambda$  zostały porównane z parametrami oddziaływania silnego także dla innych systemów barionowych: dwóch protonów, dwóch neutronów, protonu oraz lambdy, protonu i neutronu. Z powyższych prac wynika, iż przy założeniu koalescencji dwóch hiperonów  $\Lambda$  w zmierzonej funkcji korelacyjnej spodziewane byłoby wystąpienia zmniejszonej liczby par tych hiperonów, co obrazowałaby ich antykorelacja. Z omówionych wyników nie wynika zubożenie liczby mierzonych par hiperonów  $\Lambda$ , przez co hipoteza produkcji dwubarionowej cząstki H nie może zostać potwierdzona.

Osobisty wkład w rozwój omówionych tu badań dotyczył dyskusji (uwzględnienie wkładu korelacji szczątkowych w mierzone funkcje korelacyjne)) wyników oraz redagowania tekstu publikacji.



Rys. 10. Parametry oddziaływania silnego lambda-lambda (analogicznie do  $f_0$  i  $d_0$ ).

## E) Badanie zderzeń ciężkich jonów przy użyciu modeli teoretycznych

### - Adaptacja modelu EPOS w ramach programu BES na zderzaczu RHIC

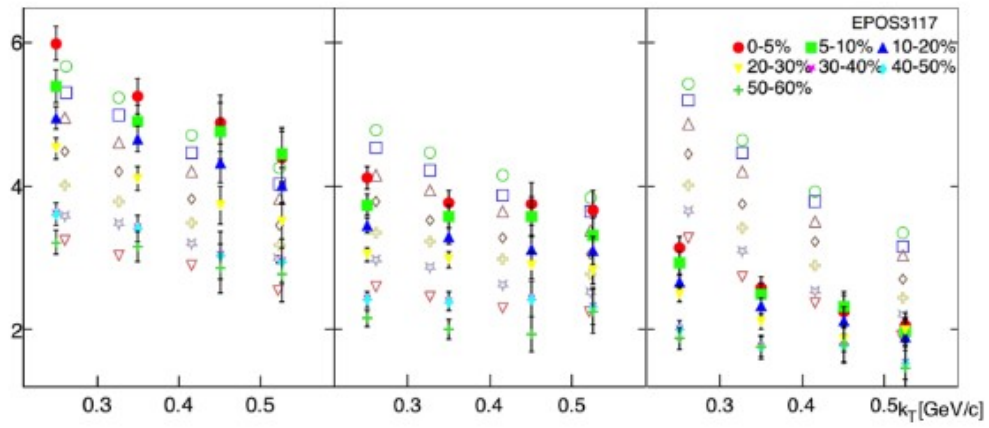
W celu weryfikacji wyników eksperymentalnych potrzeba ich porównania z przewidywaniami modeli teoretycznych. Dostępnych jest bardzo wiele, różnych teoretycznych modeli, dzięki którym możliwe jest weryfikowanie dostępnych teorii. Na potrzeby femtoskopii korelacyjnej wykorzystywane są mikroskopowe modele hadronowe oraz partonowo-strunowe. EPOS [8] jest modelem zderzeń N-N , N-A oraz A-A, wykorzystującym symulacje metodami Monte Carlo. Nazwa modelu stanowi skrót:

- podejście mechaniki kwantowej, oparte na wielokrotnych rozpraszaniach, uwzględniające zasady zachowania **E**nergii,
- oparty na **P**artonach (drabinki partonowe),
- **O**ff-shell remnantach oraz
- dzieleniu (**S**plitting) drabinek partonowych.

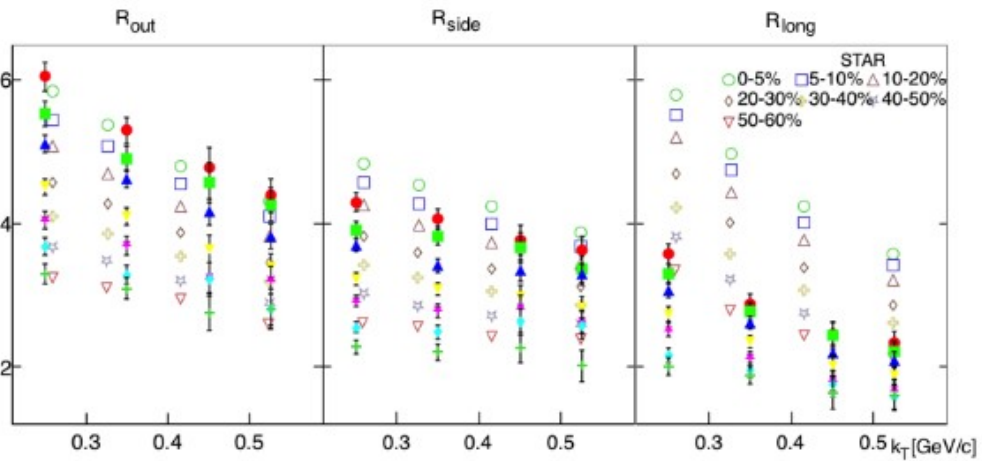
Działanie modelu EPOS jest oparty na dwóch teoriach:

- Gribov-Regge
- modelu partonowego.

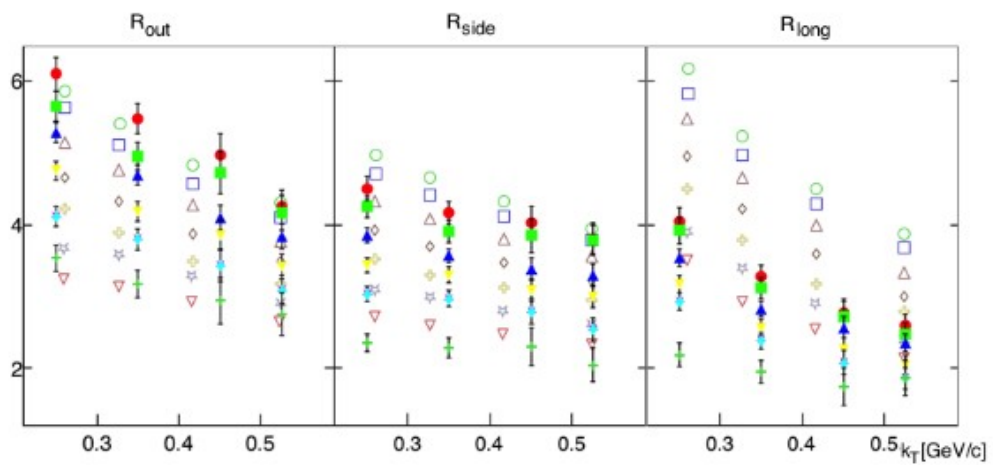
Teoria Gribov-Regge używa założeń pól efektywnych, skupia się na procesach miękkich zachodzących przy zderzeniach jonów i nukleonów. Teoria ta opisuje obiekty zwane pomeronami, które są istotne przy szacowaniu przekrojów czynnych w wielokrotnych, elastycznych rozpraszaniach. Natura pomeronów nie jest dokładnie poznana, aczkolwiek wiedza o nich jest wystarczająca, by opisać oddziaływania między cząstkami. Model partonowy z kolei wprowadza pojęcie kwarków i gluonów. Zastosowanie tych dwóch teorii jednocześnie wpływa na zgodne z przewidywaniami produkcje cząstek. Dotychczasowe wersje modelu znalazły zastosowanie w zderzeniach realizowanych przy energii  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV (najwyższe energie osiągnęte na zderzaczu RHIC) oraz przy energiach i zderzeniach realizowanych przy zderzaczu LHC. Poniższe rozważania stanowią wstęp do adaptacji modelu EPOS dla energii osiągniętych w ramach programu BES.



(a)  $\sqrt{s_{NN}} = 11.5 GeV$ .



(b)  $\sqrt{s_{NN}} = 19.6 GeV$ .



(c)  $\sqrt{s_{NN}} = 39 GeV$ .

Rys. 11. Porównanie przewidywań modelu EPOS z wynikami eksperymentu STAR

Wyniki uzyskane z symulacji modelu EPOS zostały porównane z wynikami eksperymentu STAR (rys. 11). Wnioski z przeprowadzonego porównania są następujące:

- wszystkie wartości promieni femtoskopowych, zarówno tych uzyskanych w eksperymencie, jak i te z modelu - systematycznie maleją wraz ze wzrostem wartości  $k_T$ ,
- wszystkie wartości promieni femtoskopowych (eksperymentalne, teoretyczne) zależą od centralności zderzenia. Im zderzenie jest bardziej centralne, tym większy został zmierzony rozmiar źródła w każdym z rozpatrywanych kierunków: *out*, *side* oraz *long*,
- wartości promieni  $R_{out}$  uzyskane w modelu EPOS dla trzech rozpatrywanych energii zderzenia są zbliżone do wartości uzyskanych w eksperymencie,
- wartości promieni  $R_{side}$  uzyskane w modelu EPOS są nieznacznie mniejsze (różnica wynosi ok. 0,5 fm) od wartości wyznaczonych doświadczalnie dla każdej z rozpatrywanych energii zderzenia Au - Au,
- wartości promieni  $R_{long}$  policzone z modelu EPOS są systematycznie mniejsze od tych samych wartości uzyskanych w eksperymencie STAR. Różnice te mogą wynikać z faktu, iż rozpatrywana wersja modelu EPOS nie jest jeszcze prawidłowo przystosowana do pracy w zakresie niższych energii zderzeń. Wyprodukowany wskutek takiej kolizji system nie jest „Boost-Invariant”, jak ma to miejsce przy wyższych energiach zderzenia. Przeciętna różnica pomiędzy wartościami  $R_{long}$  policzonymi z doświadczenia oraz w teorii wynosi ok. 1,5 – 2 fm.

Osobisty wkład w rozwój omówionych tu badań dotyczył analizy danych, dyskusji wszystkich wyników (przygotowanie rozkładów pędu poprzecznego, przepływu eliptycznego, femtoskopowych funkcji korelacyjnych), koordynacji całego ciągu przewidzianej pracy, redagowania tekstu pracy).

#### **- Adaptacja modelu THERMINATOR oraz korelacje femtoskopowe w modelu w ramach programu BES**

Therminator (ang. THERMal heavy IoN GenerATOR) [9] jest generatorem Monte Carlo cząstek wyprodukowanych jako skutek relatywistycznego zderzenia jonów. Został pierwotnie przystosowany do pracy na potrzeby najwyższej z osiągalnych energii RHIC'a:  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, po czym została także podjęta próba adaptacji na potrzeby eksperymentalne LHC oraz niższych energii RHIC'a - realizowanych w ramach programu BES. Therminator z wykorzystaniem implementacji termalnego (statystycznego) modelu produkcji cząstek zakłada pojedyncze wymrożenie (chemiczne i termiczne w tym samym czasie), zaimplementowana jest także możliwość uwzględnienia wszystkich możliwych rozpadów cząstek (w tym tak licznie rozpadających się rezonansów, tablice rozpadów zostały zaczerpnięte z Particle Data Group (PDG). Therminator - jako model statystyczny

wykorzystywany jest przede wszystkim do opisu procesów fizycznych dla cząstek z niższymi pędami, które oddziałują wskutek procesów miękkich (z małymi przekazami pędów).

W zakresie wyboru parametrów generacji leży możliwość:

- wyboru powierzchni wymrażania: zgodnych z parametryzacją modelu krakowskiego lub parametryzacji Blast-Wave (przystosowanie do badania systemu Boost-Invariant),
- wyboru obliczeń stosowanych przy hydrodynamicznej ewolucji nowowypowstałego systemu cząstek: Lhyquid 2+1D, Boost-Invariant Hydro, Lhyquid 3+1D Hydro.

W celu generacji danych należy podać szereg dodatkowych parametrów wejściowych (termodynamicznych, dynamicznych i geometrycznych). Do parametrów termodynamicznych należą: temperatura  $T$ , barionowy potencjał chemiczny  $\mu_B$ , dziwność  $\mu_S$ , izospin  $\mu_{I3}$ .

Do parametrów dynamicznych należą: prędkość ekspansji systemu  $V_t$ . Do parametrów geometrycznych zaliczane są: promień systemu  $\rho_{Max}$  oraz czas wymrożenia  $\tau$ .

Relacja wiążąca parametry geometryczne i dynamiczne jest następująca:  $V = \rho_{max}^2 \tau$

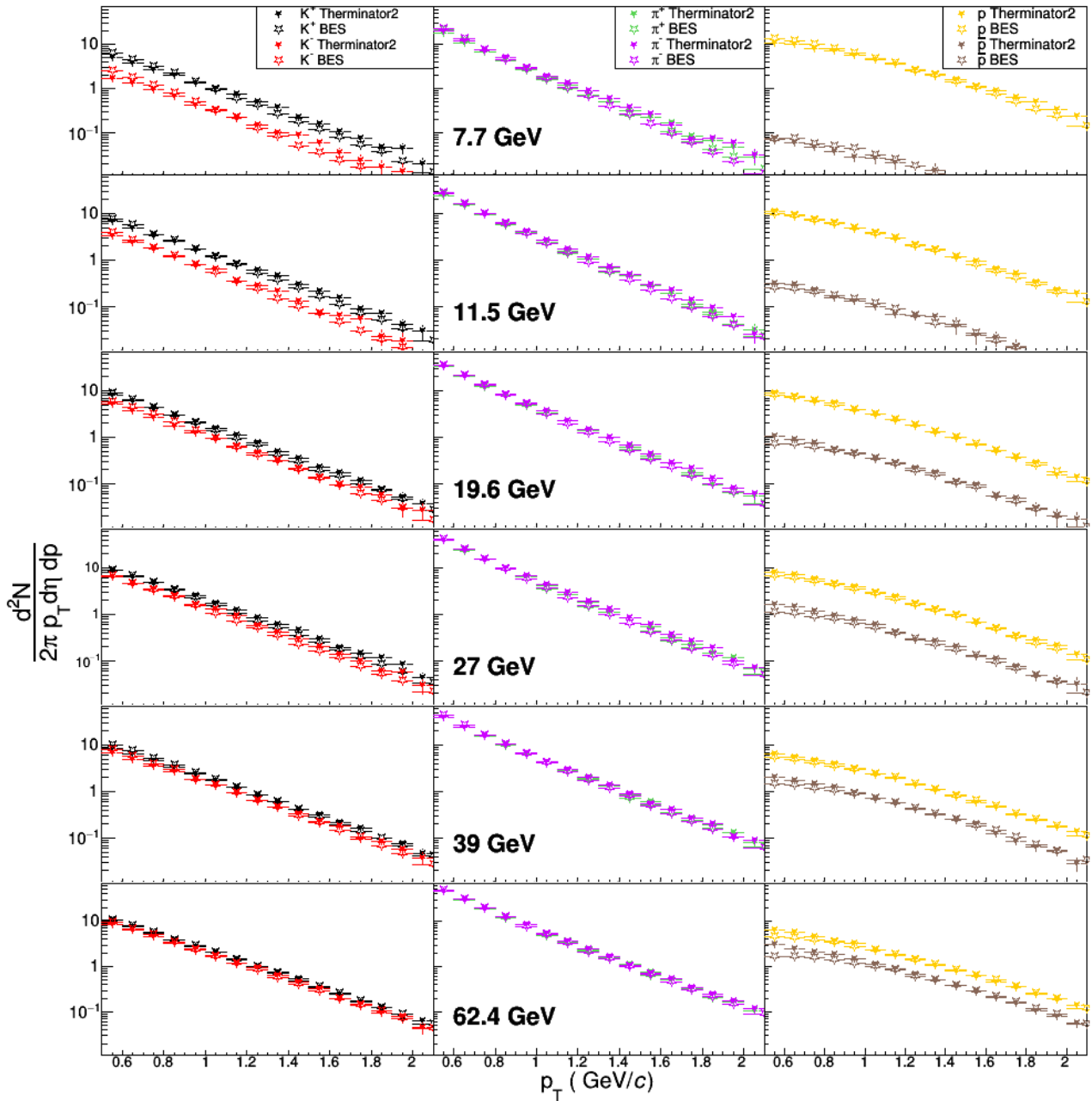
Powyższe parametry wraz z parametrami termodynamicznymi określają produkcje cząstek dla danej energii zderzenia oraz reakcji. Ogromną zaletą modelu Therminator jest możliwość uzyskania cztero-wektorów pędu-energii cząstek oraz czasu-położenia w momencie wymrożenia. Rozkład położenia oraz prędkości cząstek jest losowany zgodnie z równaniami parametryzującymi użyty model statystyczny. Uwzględniona zostało także użycie zadanej przez daną parametryzację powierzchni wymrażania. Ponadto wykonano pierwsze prace adaptacyjne Therminator'a na potrzeby programu BES.

Jako, że typ reakcji oraz jej energia nie są wejściowymi parametrami modelu, jego adaptacja na potrzeby programu BES [10] dotyczy znalezienia takiego zestawu parametrów, dla którego wygenerowane z modelu dane w najlepszy możliwy sposób opiszą dane eksperymentalne. Poszukiwanie zestawu najlepszych parametrów dotyczy oddzielnie dwóch, niezależnych ich grup:

- parametry termodynamiczne ( $T$ ,  $\mu_B$ ,  $\mu_{I3}$ ,  $\mu_S$ ), które wpływają na krotności wyprodukowanych cząstek. Ta grupa parametrów została wyliczona na podstawie założeń modelu statystycznego [10].

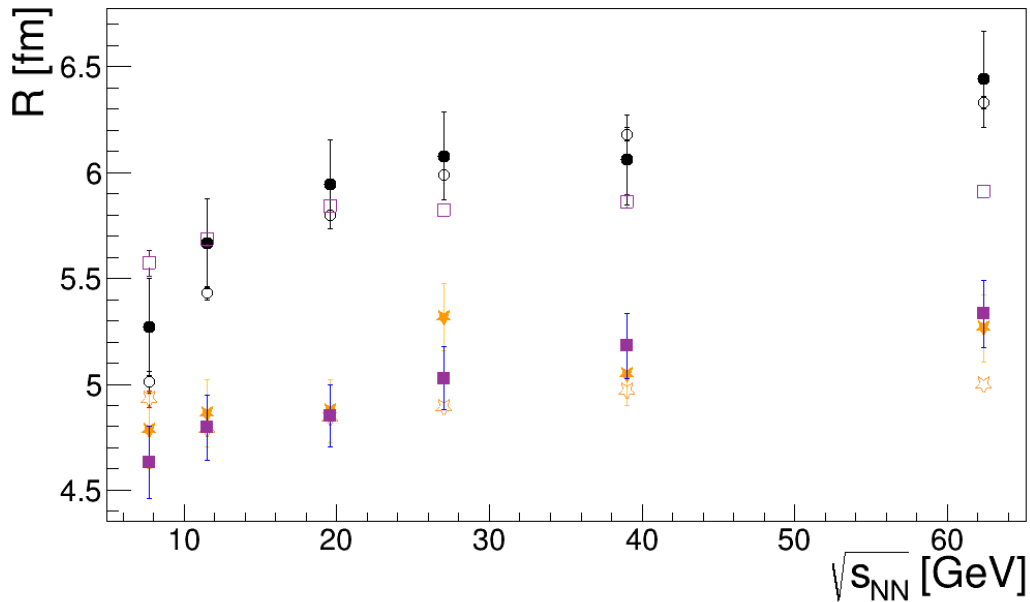


- parametry geometryczne i dynamiczne ( $\tau$ ,  $\rho_{\max}$ ,  $V_t$ ), które określają własności kinematyczne wyprodukowanych cząstek. Ta grupa parametrów została wyznaczona na podstawie weryfikacji zgodności rozkładów pędowych cząstek zarejestrowanych w eksperymencie oraz wygenerowanych w modelu.



**Rys. 12. Porównanie rozkładów pędów dla modelu Therminator i eksperymentu STAR**

Po wyznaczeniu wartości parametrów termodynamicznych zostały policzone wartości parametrów geometrycznych i dynamicznych. W ramach pracy zostały oszacowane wartości parametrów:  $\rho_{\max}$ ,  $V_t$ ,  $\tau$  i w tym celu etapy adaptacji modelu przebiegły dwustopniowo:



**Rys. 13. Porównanie promieni femtoskopowych z modelu Therminator i eksperymentu STAR**

- dopasowane zostały jednocząstkowe rozkłady z generatora Therminator2 pędy poprzeczne identyfikowalnych, naładowanych hadronów ( $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $K^+$ ,  $K^-$ ,  $p$ ,  $\bar{p}$ ) do wyników eksperymentalnych kolaboracji STAR
- zweryfikowane zostały rozkłady dwucząstkowe - pomiary femtoskopowe naładowanych mezonów  $\pi$ , porównanie zostało przeprowadzone także dla eksperymentalnych wyników STAR.

W procesie poszukiwania zestawu najlepiej odzwierciedlających wyniki eksperymentalne parametrów generatora Therminator2 zostały uwzględnione wyniki rozkładów pędów dla najbardziej centralnych zderzeń (0 – 10%) jonów Au - Au. Rys. 12 przedstawia porównania rozkładów pędowych  $p_T$  identyfikowalnych hadronów naładowanych uzyskanych w eksperymencie STAR oraz z modelu Therminator2 dla wszystkich energii programu BES. Są to wyniki dla najlepiej dopasowanych rozkładów pędowych (kryterium wyboru parametrów do uruchomienia generatora Therminator'a było zdeterminowane wartością statystycznego testu  $\chi^2$  podzielonego przez liczbę stopni swobody ndf przy wyznaczeniu zgodności wyników pomiarowych z symulacjami generatora). Tabele 1 i 2 przedstawiają zestawienie wszystkich parametrów generatora Therminator2: termodynamicznych, geometrycznych i dynamicznych dla wszystkich dotychczas rozważanych energii programu BES.

W celu weryfikacji prawidłowości funkcjonowania modelu Therminator2 została także przeprowadzona analiza korelacji femtoskopowych z uwzględnieniem efektów statystyki kwantowej dla układu identycznych pionów. Wyniki promieni femtoskopowych w funkcji energii zderzenia zostały przedstawione na Rys. 13. Otwarte symbole pochodzą z eksperymentu STAR, zamknięte symbole to symulacje modelu Therminator. Kółka prezentują wyniki dla kierunku long, gwiazdki - side, a kwadraty – out, Wartości  $R_{\text{long}}$  oraz  $R_{\text{side}}$  są przeszacowane (ale wciąż w granicy niepewności), natomiast wartości -  $R_{\text{out}}$  są niedoszacowane.

| $\sqrt{s_{NN}}$ [GeV] | T [MeV] | $\mu_B$ [MeV] | $\mu_{I_3}$ [MeV] | $\mu_S$ [MeV] |
|-----------------------|---------|---------------|-------------------|---------------|
| 7.7                   | 139.0   | 406.4         | -10.5677          | 93.4685       |
| 11.5                  | 150.1   | 303.2         | -7.9697           | 69.9562       |
| 19.6                  | 156.2   | 196.8         | -5.2882           | 45.6875       |
| 27                    | 157.6   | 109.0         | -4.0845           | 34.7938       |
| 39                    | 158.4   | 106.9         | -3.0241           | 25.1974       |
| 62.4                  | 158.8   | 68.9          | -2.0676           | 16.5409       |

"Therminator generator adaptation to the conditions of RHIC and FAIR experimental complexes",  
Engineer's Thesis, Monika Seniut

**Tab. 1: Zależność parametrów termodynamicznych od energii zderzenia.**

| $\sqrt{s_{NN}}$ [GeV] | 7.7  | 11.5 | 19.6 | 27   | 39   | 62.4 |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|
| $\rho_{max}$          | 8    | 8    | 8.2  | 8.85 | 8.7  | 9    |
| $\tau$                | 8.3  | 8.35 | 8.75 | 8.75 | 8.6  | 9.4  |
| $V_t$                 | 0.65 | 0.8  | 0.85 | 0.8  | 0.75 | 0.75 |

**Tab. 2: Zależność parametrów geometrycznych od energii zderzenia**

Zaobserwowane różnice mogą mieć związek z następującymi faktami:

- w symulacjach generatora Therminator nie została użyta żadna parametryzacja hydrodynamiczna procesu ewolucji źródła powstałego wskutek ciężkojonowego zderzenia,
- źródło powstałe wskutek ciężkojonowego zderzenia jest źródłem typu Boost-Invariant, co jest słuszne w parametryzacji dla wyższych energii zderzenia,
- porównywane były wartości promieni femtoskopowych z binu  $k_T \in [0,15; 0,60]$  GeV/c z wartościami z drugiego, eksperymentalnego średniej wartości  $k_T=0,37$  binu  $k_T$ , o średniej jego wartości  $k_T=0,31$  GeV/c.

Osobisty wkład w rozwój omówionych tu badań dotyczył analizy danych (wyznaczenie parametrów uruchomieniowych modelu, rozkładów pędowych, femtoskopowych funkcji korelacyjnych), koordynacji całego ciągu przewidzianej pracy, dyskusji wszystkich uzyskanych wyników, redagowania tekstu pracy.

## F) Podsumowanie, wnioski i perspektywy rozwoju

### Podsumowanie

Myślą przewodnią przedstawionego tu opracowania było pokazanie, że wypracowane w okresie kilkudziesięciu lat eksperymentalne metody femtoskopowej analizy danych tworzono równoległe z rozwojem teoretycznego opisu efektów kolektywnych, a uzyskiwane wyniki nie tylko wzbogacały naszą wiedzę, ale skutkowały dalszym rozwojem zarówno metod pomiarowych, jak i formalizmu teoretycznego. Przypomnijmy kilka omawianych tu przykładów:

1. W pracach Kopyłowa i Podgoreckiego, gdzie położone zostały podwaliny opisu teoretycznego korelacji femtoskopowych, zaproponowana też została metoda generacji rozkładu referencyjnego (mixing), stosowana do dzisiaj w femtoskopowej analizie danych pomiarowych.
2. Już w pierwszych pracach doświadczalnych (np. Deutschman et al.) testowano alternatywne metody generacji tła i zwracano uwagę na konieczność uwzględniania rozdzielczości detektorów, identyfikacji cząstek i innych czynników natury eksperymentalnej. Zauważono jednak również, że na uzyskane wyniki pomiarów może mieć wpływ produkcja rezonansów oraz korelacje dynamiczne.
3. Inne prace doświadczalne pokazały, że te same korelacje wymagają rozwiązywania bardzo różnych problemów, specyficznych dla danego układu dwucząstkowego. Przykładem mogą być analizy femtoskopowe dla par neutralnych pionów czy neutronów. Skutkowało to nowymi pomysłami na konfigurację układów detekcyjnych czy metody analizy danych.
4. Wyniki eksperymentalne pomiarów femtoskopowych eksperymentu STAR pokazały niezgodność z przewidywaniami modeli hydrodynamicznych („RHIC HBT puzzle”), w rezultacie czego wprowadzono szereg zmian w teoretycznych opisach reakcji ciężkich jonów.

W historycznym rozwoju femtoskopii korelacyjnej, wraz z uzyskiwaniem nowych wyników pomiarowych, coraz bardziej stawało się jasne, że geometryczna interpretacja wyznaczanych rozmiarów obszaru emisji cząstek nie odzwierciedla całej złożoności procesu, w którym emisja ta zachodzi. Do „warsztatu” pomiarów femtoskopowych wprowadzono systematyczne badanie zależności wyników od energii zderzających się jąder, centralności zderzenia oraz pędu lub masy poprzecznej emitowanych cząstek, analizę prowadzono w różnych układach odniesienia, badano zależności azymutalne, zaś rozmiar geometryczny zastąpiło wprowadzone przez Sinyukova pojęcie „length of homogeneity”. W ten sposób femtoskopia korelacyjna stała się narzędziem do

kompleksowego badania nie tylko geometrii, ale i dynamiki reakcji. Lednicki i Lyuboshitz sformułowali kompletny formalizm opisu korelacji femtoskopowych uwzględniający zarówno efekty statystyk kwantowych jak i oddziaływania w stanie końcowym. Otworzyło to drogę do badania korelacji dla różnych układów dwucząstkowych, w szczególności dla cząstek nieidentycznych. Narzuciło to również jednak nowe wymagania dotyczące np. akceptacji aparatury eksperymentalnej, bowiem obszar małych prędkości względnych oznacza znaczną różnicę w pędach cząstek o różnych masach, a więc różne krzywizny ich śladów w polu magnetycznym. Z drugiej strony, możliwość równoczesnego wyznaczenia rozmiarów obszaru emisji dla różnych układów dwucząstkowych wytyczyła kolejną nową drogę do badania dynamiki reakcji w zderzeniach ciężkich jonów. Zmierzone eksperymentalnie relacje pomiędzy rozmiarami oraz położeniami obszaru emisji pionów, kaonów i protonów wymagają odpowiadających im relacji pomiędzy charakterystykami ruchów termicznych i kolektywnych. Okazało się to nawet silniejszym testem do badania przepływów eliptycznych niż ich bezpośrednia analiza w postaci wyznaczania charakteryzującego je parametru  $v_2$ .

Korelacje cząstek nieidentycznych nie zawierają efektów typu HBT, a określone są przez oddziaływania w stanie końcowym. Skoro jednak cząstki są rozróżnialne, to staje się możliwe wyznaczenie asymetrii w czasowo-przestrzennej skali ich emisji. Dotycząca tej możliwości teoretyczna propozycja Lednickiego i współpracowników przerodziła się w nową metodę pomiarową w której wyznacza się nie tylko funkcje korelacyjne, ale ich stosunek, tzw. „double ratio”. Wymaga to również dedykowanej temu metody analizy danych.

Specyfika eksperymentalnych metod badania efektów femtoskopowych wymaga rozwiązania wielu problemów związanych z analizą danych, które nie występują w innych przypadkach. Omawiane tu efekty, które żargonowo nazywamy: *splitting* (efekt rekonstrukcji dwóch śladów cząstek zamiast jednego), *merging* (efekt rekonstrukcji jednego śladu cząstek zamiast dwóch), *two-particle resolution* (rozdzielczości pędowej) i *purity* (prawdopodobieństwa poprawnej identyfikacji typu cząstki), są marginalne przy badaniu rozkładów jednocząstkowych, ale odgrywają ważną rolę i muszą być uwzględnione w analizie korelacyjnej, w szczególności dla obszaru kinematycznego małych prędkości względnych. Wraz z rozszerzeniem femtoskopii korelacyjnej o badanie korelacji w układach zawierających hiperony i antycząstki pojawiły się nowe możliwości, ale i nowe trudności pomiarowe. Chyba największymi okazały się korelacje rezydualne dla przypadków, kiedy nie jest możliwe rozróżnienie protonów emitowanych w reakcji od tych z rozpadów słabych. Uwzględnienie tej trudności pomiarowej wymagało opracowania specjalnej procedury analizy danych w celu wprowadzenia czynników korekcyjnych.

Szeroka analiza i wyznaczenie rozmiarów obszaru emisji dla wielu układów dwucząstkowych pozwoliło na odwrócenie zadania pomiarowego femtoskopii korelacyjnej. Potrafiąc opisać korelacje w układach zawierających antycząstki i hiperony można w oparciu o wyniki wykonanych pomiarów wyznaczyć parametry charakteryzujące potencjał oddziaływań silnych w np. układach, dla których nie jest to możliwe innymi metodami.

## **Wnioski**

1. Przedstawione tu specyficzne cechy, możliwości i trudności analizy femtoskopowej pokazują, że femtoskopia korelacyjna jest potężnym narzędziem badawczym o wielorakich zastosowaniach w fizyce hadronów i ciężkich jonów.
2. Analiza femtoskopowa jest jednak narzędziem trudnym, którego obsługa wymaga przygotowania zarówno od strony fizyki badanych procesów, jak i metodyki prowadzenia pomiarów i analizy uzyskiwanych danych.
3. W rezultacie, tylko niektóre zespoły zajmujące się analizą danych z aktualnie realizowanych eksperymentów zderzeń ciężkich jonów podejmują się prowadzenia analizy femtoskopowej.
4. Zespół z Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej ma tradycje prowadzenia takich badań sięgające czasów Kopyłowa i Podgoreckiego, a obecnie jest to przedmiot aktywnie prowadzonych analiz w działającej na Wydziale Pracowni Reakcji Ciężkich Jonów, HIRG (Heavy Ion Reaction Group).
5. Dynamicznie rozwijająca się dziedzina badawcza, jaką jest z całą pewnością femtoskopia korelacyjna, wymaga współpracy teoretyków i eksperymentatorów, wymiany doświadczeń pomiędzy zespołami prowadzącymi analizy danych, dyskusji uzyskiwanych wyników, innymi słowami – wymaga współpracy w skali międzynarodowej.
6. Współpraca taka jest aktualnie realizowana, a pracownia HIRG aktywnie w niej uczestniczy. Przejawem tej współpracy są m.in. organizowane cyklicznie konferencje WPCF (Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy), z których ostatnia odbywała się w Krakowie, są nim także spotkania współpracy GDRE (*Groupment de Recherche European*) odbywające się corocznie od wielu lat w Nantes (Francja).

## **Perspektywy rozwoju**

1. Jak już wspomniano, femtoskopia korelacyjna jest dziedziną wciąż rozwijającą się, a rozwój ten ukazuje często jej nieznane wcześniej możliwości. Dlatego pomiary femtoskopowe stanowią od lat element programów badawczych największych eksperymentów zderzeń ciężkich jonów, jak STAR czy ALICE. Rozwój ten zwykle wymaga jednak rozwiązania

szeregu nowych problemów związanych z prowadzeniem pomiarów i analizą danych. Prace nad tym będą dalej kontynuowane.

2. Aktualny przedmiot zainteresowania społeczności fizyków ciężkich jonów stanowią te obszary diagramu fazowego materii jądrowej, gdzie spodziewane jest znalezienie dwóch wielkości charakteryzujących mechanizm przejścia fazowego od materii hadronowej do kwarkowej. Wielkości te, to: „critical point” i „onset of deconfinement”. Chodzi tu o obszar wyższych wartości barionowego potencjału chemicznego, osiągalny z pomocą zderzeń ciężkich jonów zachodzących przy niższych energiach niż te na RHIC i LHC. Badanie tych obszarów realizowane jest już w eksperymencie NA61 / SHINE na SPS w CERN, oraz w ramach programu „Beam Energy Scan (BES)” eksperymentu STAR na RHIC. W pomiarach femtoskopowych programu BES zaangażowana jest już obecnie grupa z pracowni HIRG.
3. Spodziewane jest, że największe gęstości barionowe osiągnęte będą w obszarze energii w środku masy na parę nukleonów około 10 GeV. Tam oczekiwane jest uformowanie tzw. fazy mieszanej „mixed phase” złożonej z materii hadronowej i kwarkowej. Jakie będą własności tej materii, jak zidentyfikować jej utworzenie, jaki będzie jej „czas życia”? Odpowiedzi na te i podobne im pytania szukać będą przygotowywane aktualnie eksperymenty ciężkich jonów w Dubnej – NICA-MPD oraz w Darmstadt - FAIR-CBM. Eksperymenty te mają w swych programach badawczych pomiary femtoskopowe i już opracowywane jest dedykowane tym pomiarom oprogramowanie oraz prowadzone są symulacje komputerowe, w których też uczestniczą członkowie grupy HIRG.
4. Wiemy, że parametryzacja efektów korelacyjnych rozkładami Gaussa nie zawsze odzwierciedla rzeczywisty kształt obszaru emisji. W niektórych przypadkach znacznie lepszą zgodność z danymi uzyskuje się dla innych parametryzacji, np. eksponencjalnej, lub konieczna jest parametryzacja dwoma rozkładami gaussowskimi. Wiąże się to również z tym, że statystyczna precyzja danych jest coraz lepsza i kryteria dopasowania mogą być bardziej surowe. Modyfikacje metod analizy w celu lepszego odtworzenia parametrów charakteryzujących czasowo-przestrzenne rozmiary obszarów emisji różnego typu cząstek są obecnie i będą w przyszłości jednym z zadań femtoskopii.
5. Jednym ze sposobów radykalnego rozwiązania problemu jest metoda obrazowania źródeł („imaging of sources”) zwana czasami „tomografią femtoskopową”. Choć potencjalne możliwości tej metody są niezwykle obiecujące, to jednak praktyczne jej zastosowanie stwarza wiele trudności pomiarowych i obliczeniowych. Rozwój tej metody z pewnością będzie także jednym z zadań femtoskopii w przyszłości.

6. Uzyskiwanie coraz to nowych danych, modernizacja aparatury pomiarowej i poprawa jakości danych, to czynniki stwarzające możliwości nie tylko bardziej precyzyjnej analizy, ale również wykonywania pomiarów femtoskopowych dla układów dwucząstkowych dotychczas nieanalizowanych, do prowadzenia analiz dla układów trójcząstkowych, lub do stosowania innych podejść dla uzyskania danych o czasowo-przestrzennych rozmiarach, np. specyficznej analizy produkcji deuteronów.
7. Można powiedzieć, że w pracowni HIRG na Wydziale Fizyki PW, femtoskopia korelacyjna jest czymś w rodzaju „spécialité de la maison”. Pracownia posiada rozwinięte specjalistyczne metody analizy danych i niezbędne do tego celu oprogramowanie, z tej dziedziny wykonano w pracowni wiele prac magisterskich i doktorskich, a dalsze są w przygotowaniu, utrzymywana jest ścisła współpraca z wiodącymi na świecie teoretykami, prowadzone są symulacje komputerowe z użyciem specjalistycznych generatorów zderzeń ciężkich jonów, wyniki referowane są na konferencjach międzynarodowych. Działalność ta w naturalny sposób będzie kontynuowana w przyszłości.

#### **G) Bibliografia części opisu osiągnięć**

- [1] L. Adamczyk, H. Zbroszczyk at al., **Phys.Rev. C92 (2015) no.1, 014904**
- [2] H. Zbroszczyk for the STAR Collaboration, **EPJ Web Conf. 71 (2014) 00144**; H. Gos for the STAR Collaboration, **Eur.Phys.J. C49 (2007) 75-80**
- [3] S. Siejka for the STAR Collaboration, to be published in conference proceedings
- [4] L. Adamczyk, H. Zbroszczyk at al., **Nature 527 (2015) 345-348**
- [5] J. Adams, H. Gos et al., **Phys.Rev.C74:064906,2006**
- [6] A. Kisiel, H. Zbroszczyk, M. Szymański, **Phys.Rev. C89 (2014) no.5, 1054916**
- [7] L. Adamczyk, H. Zbroszczyk at al., **Phys.Rev.Lett. 114 (2015) no.2, 022301**
- [8] EPOS, K. Werner, **Nucl. Phys. Proc. Suppl. 175-176 (2008) 81-87**, K. Werner, T. Hirano et al., **Nucl. Phys. Proc. Suppl. 196 (2009) 36-43**, M. Stefaniak, H. Zbroszczyk, **EPJ Web Conf. 164 (2017) 07013**, **Acta Phys. Polon. Supp. 8 (2015) 1031**,
- [9] THERMINATOR W. Broniowski, W. Florkowski et al., **Comput. Phys. Commun. 174 (2006) 669-687**, W. Broniowski, M. Chojnacki et al., „THERMINATOR 2: **Comput. Phys. Commun. 183 (2012) 746-773**,
- [10] H. Zbroszczyk, P. Szymański, plakat konferencyjny Quark Matter 2018.



## V Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych

### A) Wskaźniki

- **Sumaryczny Impact Factor według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania: 55,87 (z dnia 21 listopada 2018 r.),** policzony jako iloraz liczby cytowań oraz liczby publikacji.
- **Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science (WoS): 22 515 (z dnia 21 listopada 2018 r.)**
- **Indeks Hirscha według bazy Web of Science (WoS): 78 (z dnia 21 listopada 2018 r.)**

### B) Publikacje naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JRC)

**Naukowy dorobek na dzień 21 listopada 2018 r. wynosi 407 publikacje (w tym 391 prac kolaboracyjnych, gdzie udział szacowany jest jako 1%).**

Wykaz publikacji, na bazie których powstał tekst monografii habilitacyjnej:

1. A. Kisiel, H. Zbroszczyk, M. Szymański, „Extracting baryon-antibaryon strong interaction potentials from  $p - \Lambda$  femtoscopic correlation functions”, **Phys.Rev. C89 (2014) no.5, 1054916** – szacowany udział 30% (analiza danych, dyskusja wyników).
2. L. Adamczyk, H. Zbroszczyk at al., „Measurement of Interaction between Antiprotons”, **Nature 527 (2015) 345-348** – szacowany udział 15% (analiza niepewności systematycznych, dyskusja wyników, redagowanie tekstu publikacji).
3. L. Adamczyk, H. Zbroszczyk at al., „Beam-energy-dependent two-pion interferometry and the freeze-out eccentricity of pions measured in heavy ion collisions at the STAR detector”, **Phys.Rev. C92 (2015) no.1, 014904** – szacowany udział 10% (dyskusja wyników, redagowanie tekstu publikacji).
4. L. Adamczyk, H. Zbroszczyk at al., „ $\Lambda - \Lambda$  Correlation Function in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV”, **Phys.Rev.Lett. 114 (2015) no.2, 022301** – szacowany udział 10% (dyskusja wyników, redagowanie tekstu publikacji).
5. M. Stefaniak, H. Zbroszczyk, „Examination of the heavy-ion collisions using EPOS model in the frame of BES program at RHIC”, **EPJ Web Conf. 164 (2017) 07013** – szacowany udział 50% (analiza danych, dyskusja wyników, redagowanie tekstu publikacji).

6. K. Brzeziński, P. Szymański, H. Zbroszczyk, „Two-particle Correlations Using THERMINATOR Model for BES”, **Acta Phys.Polon.Supp. 9 (2016) 193** – szacowany udział 30% (analiza danych, dyskusja wyników, redagowanie tekstu publikacji).
7. A. Kisiel, H. Zbroszczyk, M. Szymański, „Baryon femtoscopy considering residual correlations as a tool to extract strong interaction potentials”, **EPJ Web Conf. 95 (2015) 04064** – szacowany udział 30% (analiza danych, dyskusja wyników, redagowanie tekstu publikacji).
8. H. Zbroszczyk for the STAR Collaboration, „Proton femtoscopy in STAR STAR Collaboration”, **EPJ Web Conf. 71 (2014) 00144** – szacowany udział 100% (analiza danych, dyskusja wyników, redagowanie tekstu publikacji).
9. H. Zbroszczyk for the STAR Collaboration, „Two-proton femtoscopy at STAR”, **PoS WPCF2011 (2011) 006** – szacowany udział 100% (analiza danych, dyskusja wyników, redagowanie tekstu publikacji).
10. H. Zbroszczyk for the STAR Collaboration, „Plans for correlation studies for BES program at RHIC”, **Phys.Part.Nucl.Lett. 8 (2011) 928-930** – szacowany udział 100% (analiza danych, dyskusja wyników, redagowanie tekstu publikacji).
11. H. Zbroszczyk for the STAR Collaboration, „Proton femtoscopy at STAR”, **Phys.Part.Nucl.Lett. 8 (2011) 931-933** – szacowany udział 100% (analiza danych, dyskusja wyników, redagowanie tekstu publikacji).
12. H. Gos for the STAR Collaboration, „Proton-proton, anti-proton-anti-proton, proton-anti-proton correlations in Au+Au collisions measured by STAR at RHIC”, **Eur.Phys.J. C49 (2007) 75-80** - szacowany udział 100% (analiza danych, dyskusja wyników, redagowanie tekstu publikacji).
13. H. Gos, „Baryon - baryon correlations in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 62$  GeV and  $\sqrt{s_{NN}} = 200$ -GeV, measured in the STAR experiment at RHIC”, **Nukleonika 51 (2006) suppl. 3, 59-63** - szacowany udział 100% (analiza danych, dyskusja wyników, redagowanie tekstu publikacji).
14. The particle interferometry method as a tool reflecting evolution of hadron source, **AIP Conf.Proc. 828 (2006) 458-463** - szacowany udział 100% (analiza danych, dyskusja wyników, redagowanie tekstu publikacji).
15. J. Pluta, Z. Chajęcki, H.P. Gos, P.K. Skowroński, Particle correlations to be seen by ALICE, **Nukleonika 49 (2004) suppl.2, 103-108** - szacowany udział 20% (analiza danych, dyskusja wyników).

C) **Wygłoszenie referatów na międzynarodowych i krajowych konferencjach tematycznych**  
**30 wystąpień konferencyjnych, w tym: 6 referatów zaproszonych, 11 referatów**  
**wygłoszonych w imieniu kolaboracji STAR – po doktoracie.**

**24 wystąpienia konferencyjne, w tym: 2 referaty zaproszonych, 11 referatów**  
**wygłoszonych w imieniu kolaboracji STAR – przed doktoratem.**

**Po doktoracie:**

1. 08.07-14.07.2018, XX GDRE WORKSHOP on Heavy Ions at Relativistic Energies, SUBATECH - Nantes (Francja), „Baryon-baryon femtoscopy in STAR”.
2. 07.06-12.16.2018; 15<sup>th</sup> International Workshop on Meson Physics, Kraków (Polska); **referat zaproszony:** „Highlights from the STAR experiment” - wygłoszony w imieniu kolaboracji STAR.
3. 22.05-28.05.2018; XIII Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy (WPCF 2018), Kraków (Polska), **referat zaproszony:** „Baryon-baryon femtoscopy in STAR” - wygłoszony w imieniu kolaboracji STAR.
4. 13.05-19.05.2018, Quark Matter 2018- XXVIIth International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, Wenecja (Włochy); Plakat: „Adaptation of the THERMINATOR model for BES program”.
5. 13.05-19.05.2018, Quark Matter 2018- XXVIIth International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, Wenecja (Włochy); Plakat: „Beam Energy Scan program with EPOS model”.
6. 05-07.01.2018, XIII Polish Workshop on Relativistic Heavy-Ion Collisions, Wrocław (Polska), „How to adapt THERMINATOR model for Beam Energy Scan program”.
7. 06.10-10.10.2017, NICA days, Warszawa (Polska), „How to adapt Therminator model for Beam Energy Scan Program”.
8. 17.08-29.08.2017 - International Conference on New Frontier in Physics, Kreta (Grecja); „Two-particle correlations using THERMINATOR model for BES program”.
9. 03.07-07.07.2017, XIX GDRE WORKSHOP - Heavy Ions at Relativistic Energies; Nantes (Francja) „Adaptation of the THERMINATOR model for the BES program”.
10. 27.06-29.06.2017, STAR Regional Meeting, Warszawa (Polska), „Adaptation of Therminator for BES”.
11. 27.06-29.06.2017, STAR Regional Meeting, Warszawa (Polska) „Kaon femtoscopy in BES”.

12. 30.05-06.06.2016, [XXXVIII-th IEEE-SPIE Joint Symposium](#), Wilga (Polska) „Baryon-baryon correlations in STAR” - wygłoszony w imieniu kolaboracji STAR.
13. 06.07-14.07.2016, International Conference on New Frontier in Physics, Kreta (Grecja); „Proton-proton femtoscopy”.
14. 24.08-30.08.2015 – International Conference on New Frontier in Physics, Kreta (Grecja); „Two-particle correlations using THERMINATOR model for BES program”.
15. 03.11-07.11.2015 - Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy, Warszawa (Polska); „Two-particle proton correlations at BES energies”.
16. 03.11-07.11.2015 - Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy, Warszawa (Polska); „Two-particle correlations using THERMINATOR model for BES energies”.
17. 14.09-18.09.2015 – 26th CBM Collaboration Meeting, (Kraków); **referat zaproszony:** „Beam Energy Scan program in STAR” - wygłoszony w imieniu kolaboracji STAR.
18. 28.08–5.09.2013 – International Conference on New Frontier in Physics, Kreta (Grecja); „Protons femtoscopy in STAR”- wygłoszony w imieniu kolaboracji STAR.
19. 13.06-15.06.2013 STAR Regional Meeting: Heavy Quark Production and Correlations, Praga (Czechy); „Protons femtoscopy in STAR”.
20. 05.11 – 08.11.2013: „Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy, Acireale (Włochy); „Two-proton femtoscopy at STAR”- wygłoszony w imieniu kolaboracji STAR.
21. 05.11 – 07.11.2013: „Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy, Acireale (Włochy); **referat zaproszony:** „Femtoscopy of widely varying systems”.
22. 05.11 – 07.11.2012 – STAR Regional Meeting: Heavy Quark Production, Jets and Correlations, Warszawa (Polska); „Proton femtoscopy in STAR”.
23. 20.09 – 24.09.2011: „Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy, Tokyo (Japonia); „Two-proton femtoscopy at STAR” - wygłoszony w imieniu kolaboracji STAR.
24. 15.02-18.02.2011: NA61/SHINE and NA49 Software and Analysis meeting, Warszawa (Polska); **referat zaproszony:** „Beam Energy Program at STAR” – wygłoszony w imieniu kolaboracji STAR.
25. 11.12-12.12.2010: „7<sup>th</sup> Polish Relativistic Heavy Ion Workshop, Warszawa (Polska); „Femtoscopy measurements in the frame of Beam Energy Scan program at STAR” - wygłoszony w imieniu kolaboracji STAR.
26. 14.09-18.09.2010, „Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy, Kijów (Ukraina); „Plans for correlation studies for BES program at STAR” - wygłoszony w imieniu kolaboracji STAR.

27. 14.09-18.09.2010, Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy, Kijów (Ukraina);  
„Two-proton femtoscopy at STAR” - wygłoszony w imieniu kolaboracji STAR.
28. 05.07-07.07.2010; STAR Regional Meeting: Heavy Quark Production and Correlations:  
Warszawa (Polska); „Two-proton correlations for BES program”.
29. 18.12.2009; Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, Instytut Problemów Jądrowych;  
**referat zaproszony**: „Zderzenia ciężkich jonów obserwowane w eksperymencie STAR”.
30. 14.10-17.10.2009, Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy, CERN (Szwajcaria);  
„Two-proton correlations”.

## 2009, 2012 – urlopy macierzyńskie

### Przed doktoratem:

1. 04.02-10.02.2008; Quark Matter 2008 - International Conference on Ultra-relativistic  
Nucleus-Nucleus Collisions; Jaipur (Indie); Plakat: „Baryon correlations in STAR” -  
zaprezentowany w imieniu kolaboracji STAR.
2. 01.08- 03.08.2007; Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy; Santa Rosa (USA);  
„Proton correlations in STAR” - **referat zaproszony**, wygłoszony w imieniu kolaboracji  
STAR.
3. 19.05- 26.05.2007; School on Collective Dynamics; Berkeley (USA); „Proton- proton  
correlations in STAR”, wygłoszony w imieniu kolaboracji STAR.
4. 19.02- 24.02.2007; Workshop of European Research Group on Ultra relativistic Heavy Ion  
Physics; Grybów (Polska); „Proton femtoscopy in STAR”.
5. 19.02- 24.02.2007; Workshop of European Research Group on Ultra relativistic Heavy Ion  
Physics; Grybów (Polska); „Hadron correlations in EPOS and UrQMD models”.
6. 09.02.2007; wygłoszony dla laboratorium SUBATECH; Nantes (Francja); „Proton  
femtoscopy in STAR”.
7. 11.12- 13.12.2006; RHIC Winter School; Budapest (Węgry); „Proton femtoscopy in  
STAR”- wygłoszony w imieniu kolaboracji STAR.
8. 14.11- 20.11.2006; Quark Matter 2006- International Conference on Ultra-relativistic  
Nucleus-Nucleus Collisions; Shanghai (Chiny); Plakat: „Proton femtoscopy in STAR”,  
zaprezentowany w imieniu kolaboracji STAR.
9. 25.09- 29.09.2006; SPHIC 2006; Catania (Włochy); „Proton femtoscopy in STAR”,  
wygłoszony w imieniu kolaboracji STAR.

10. 10.07- 24.07.2006; Workshop of European Research Group on Ultra relativistic Heavy Ion Physics; Nantes (Francja); „Proton-proton correlations at STAR”.
11. 15.05- 20.05.2006; Hot Quarks 2006; Sardinia (Włochy); „Proton-proton correlations at STAR”, wygłoszony w imieniu kolaboracji STAR.
12. 25.04.2006; Femtoscopy In Heavy Ion Collisions; Warszawa (Polska), „HBT correlations at STAR”.
13. 09.03- 14.03.2006; Workshop of European Research Group on Ultrarelativistic Heavy Ion Physics; Dubna (Rosja); „Baryon-baryon correlations at STAR”.
14. 05.12- 07.12.2005; RHIC Winter School 05; Budapeszt (Węgry); „Residual correlations in the STAR experiment”, wygłoszony w imieniu kolaboracji STAR.
15. 31.08- 06.09.2005; Mazurian Lakes Conference on Physics; Piaski, Polska; „Baryon- baryon correlations in the STAR experinent”, wygłoszony w imieniu kolaboracji STAR.
16. 15.08- 17.08.2005; Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy; Kromeriz, Czechy; „Two- particle interferometry as method reflecting evolution of hadron source”.
17. 04-09.08.2005; Quark Matter 2005 - International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, Budapeszt (Węgry); Plakat: „Baryon- baryon correlations in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=62\text{GeV}$  and  $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$  measured in the STAR experiment at RHIC”, zaprezentowany w imieniu kolaboracji STAR.
18. 27.07- 02.08.2005; Star Collaboration Meeting, Warszawa (Polska), „Baryon- baryon correlations at STAR”.
19. 27.07- 02.08.2005; Star Collaboration Meeting, Warszawa (Polska), „Proton- proton correlations at STAR”.
20. 15.06- 15.07.2005; Workshop of European Research Group on Ultrarelativistic Heavy Ion Physics; Nantes (France); „Particle correlations at STAR from the Other Side Of Mirror”
21. 15.06- 15.07.2005; Workshop of European Research Group on Ultrarelativistic Heavy Ion Physics; Nantes (Francja); „Analysis of particle correlations in the reactions: Au+Au, d+Au, p+p at RHIC”.
22. 05.06.2005; Wygłoszony dla laboratorium SUBATECH, Nantes (Francja); „Analysis of particle correlations in the reactions: Au+Au, d+Au, p+p at RHIC”.
23. 17.02.2005; Ohio State University; Columbus (USA); „Non-identical particle correlations at the STAR experiment”- **referat zaproszony**, wygłoszony w imieniu kolaboracji STAR.
24. 01.12- 03.12.2004; RHIC Winter School; Budapeszt (Węgry); „Non-identical particle correlations at the STAR experiment”.

**D) Kierowanie międzynarodowymi i krajowymi projektami badawczymi oraz udział w takich projektach**

**10 projektów (1 projekt Komitetu Badań Naukowych, 6 projektów Narodowego Centrum Nauki, 4 projekty dziekańskie)**

1. Grant promotorski KBN: „Analiza korelacji barion-barion w relatywistycznych zderzeniach jądrowych realizowanych w eksperymencie STAR”- realizacja w latach 2007-2008, główny wykonawca.
2. Grant dziekański: „Korelacje dwucząstkowe w programie Beam Energy Scan w eksperymencie STAR” - realizacja w roku 2011, kierownik projektu.
3. Grant dziekański: „Korelacje dwucząstkowe barion-barion w eksperymencie STAR” - realizacja w roku 2012, kierownik projektu.
4. Grant dziekański: „Femtoscopia korelacyjna w eksperymencie STAR” - realizacja w roku 2013, kierownik projektu.
5. Grant NCN: „Badanie zderzeń relatywistycznych hadronów i jonów w eksperymencie STAR przy akceleratorze RHIC w BNL” – realizacja w latach 2011-2015, wykonawca projektu.
6. Grant NCN: „Femtoscopia korelacyjna zderzeń protonów i ciężkich jonów w eksperymencie ALICE na zderzaczu LHC w CERN” – realizacja w latach 2012-2015, wykonawca projektu
7. Grant NCN: „Utworzenie Centrum Femtoskopii na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej”, realizacja w latach: 2013-2018, kierownik projektu
8. Grant NCN: „Badanie dwucząstkowych oddziaływań nieidentycznych hadronów w: ALICE na LHC i STAR na RHIC”, realizowany w latach 2015-2018, wykonawca projektu.
9. Grant NCN: „Femtoscopia korelacyjna zderzeń protonów i ciężkich jonów w eksperymencie ALICE na zderzaczu LHC w CERN”, realizacja w latach: 2011-2015, wykonawca projektu.
10. Grant NCN: „Badanie oddziaływań barionów i antybarionów w zderzeniach relatywistycznych jonów w eksperymentach STAR na RHIC i ALICE na LHC” - realizowany w latach 2018-2020 – wykonawca projektu

#### **E) Nagrody i wyróżnienia**

- i. 18 czerwca 2004 r.– ukończenie studiów magisterskich z wyróżnieniem
- ii. 1 października 2004 r. – 30 czerwca 2008 r.– stypendystka ambasady Francuskiej
- iii. 25 lutego 2016 r. – nagroda Dziekana Wydziału Fizyki za wyróżniające osiągnięcia dydaktyczne w roku akademickim 2014/15 (nadana na podstawie wyróżnienia w procesie ankietyzacji wykładowców Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej)
- iv. 20 kwietnia 2017 r.– nagroda Dziekana Wydziału Fizyki za wyróżniające osiągnięcia dydaktyczne w roku akademickim 2015/16 (nadana na podstawie wyróżnienia w procesie ankietyzacji wykładowców Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej)

#### **F) Staże w zagranicznych i krajowych ośrodkach naukowych lub akademickich**

1. Laboratorium SUBATECH, Nantes, Francja, lipiec-sierpień 2003, staż studencki
2. Laboratorium Brookhaven National Laboratory, styczeń – marzec 2004, staż studencki
3. Laboratorium Brookhaven National Laboratory, styczeń – luty 2005, staż doktorski
4. Ohio State University, luty 2015, staż doktorski
5. Laboratorium SUBATECH, Universite de Nantes, październik 2004- czerwiec 2008 – doktorantka w systemie współopieki
6. W latach 2008-2018 – liczne, krótsze wyjazdy realizowane w ramach współpracy z laboratorium BNL oraz SUBATECH.

#### **G) Członkostwo w międzynarodowych i krajowych organizacjach, towarzystwach naukowych oraz udział w konsorcjach i sieciach badawczych**

- i. Kolaboracja STAR, 2003- 2018 – członek.
- ii. Kolaboracja ALICE, 2003-2018 – członek.
- iii. Członek STAR Talk Committe (zespołu wybierające reprezentantów kolaboracji STAR na międzynarodowych konferencjach), 2011-2013, członek zespołu.
- iv. Reprezentant Politechniki Warszawskiej i członek Rady w kolaboracji STAR – lider zespołu
- v. Lider zespołu z Politechniki Warszawskiej uczestniczącego w eksperymencie STAR.
- vi. Uczestnik GDRE (Groupement De Recherche Européen).
- vii. Członek Konsorcjum PL-STAR zbierającego polskie grupy naukowe uczestniczące w eksperymencie STAR: Politechnika Warszawska, Politechnika Krakowska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Instytut Fizyki Jądrowej.
- viii. Sekretarz Komisji Egzaminacyjnej Dyplomowej – studia inżynierskie, kierunek Fizyka Techniczna, specjalność Fizyka Komputerowa, lata: 2010-2016



#### **H) Uczestnictwo w programach europejskich oraz innych programach międzynarodowych i krajowych w ramach działalności popularyzatorskiej i dydaktycznej**

1. Międzynarodowe warsztaty „Master Class” organizowane przez CERN - wykład dla uczniów szkół średnich „Dziwność- sygnatura plazmy kwarkowo-gluonowej”.
2. Uczestnik GDRE (Groupement De Recherche Européen) – grupy skupiającej naukowców (teoretyków i eksperymentatorów) z krajów Europy (także spoza terenu Unii Europejskiej), pracujących nad zagadnieniami fizyki wysokich energii.
3. Wykładowca fizyki w programie Politechniki Warszawskiej „Foundation Year”, przygotowującym zagranicznych, pochodzących spoza krajów Unii Europejskiej kandydatów na studia w Politechnice Warszawskiej.

#### **I) Udział w komitetach organizacyjnych międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych**

1. GDRE meeting, 2011, Warszawa, członek komitetu organizacyjnego oraz programowego, organizator sesji tematycznych
2. STAR Regional Meeting, 2012, Warszawa, przewodniczący komitetu organizacyjnego oraz programowego, organizator sesji tematycznych
3. STAR Regional Meeting, 2013, Praga (Czechy), członek komitetu organizacyjnego oraz programowego, organizator sesji tematycznych
4. STAR Regional Meeting, 2014, Warszawa, przewodniczący komitetu organizacyjnego oraz programowego, organizator sesji tematycznych
5. Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy & NICA Days in Warsaw, 2015, Warszawa, członek komitetu organizacyjnego oraz programowego.
6. STAR Regional Meeting, 2016, Kraków, członek komitetu organizacyjnego oraz programowego.
7. STAR Collaboration Meeting, 2018, Warszawa, przewodnicząca komitetu organizacyjnego

#### **J) Aktywny udział w międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych z zakresu popularyzacji nauki**

- i. Hanna Zbroszczyk, 2014, „Dziwność – sygnatura plazmy kwarkowo-gluonowej”, Warsztaty MasterClass, Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej.
- ii. Hanna Zbroszczyk, 2015, „Dziwność – sygnatura plazmy kwarkowo-gluonowej”, Warsztaty MasterClass, Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

- iii. Hanna Zbroszczyk, 2017, „Dziwność – sygnatura plazmy kwarkowo-gluonowej”, Warsztaty MasterClass, Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

#### K) **Udział w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism oraz recenzowanie publikacji w czasopismach**

- Nukleonika 49 (2004) Suppl. 2, recenzent, redaktor z uprawnieniami do decydowania o przyjmowaniu prac do druku, członek rady naukowej.
- Nukleonika 51 (2006) suppl. 3, recenzent, redaktor, członek rady naukowej.
- Acta Physica Polonica, Suppl. 9 (2016), recenzent, członek rady naukowej.

#### L) **Osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji nauki**

##### i) Dydaktyka

We wszystkich przypadkach prowadzony i koordynowany był cały przedmiot

- Programowanie obiektowe** – wykład w latach: 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, zajęcia laboratoryjne w latach 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018
- Komputerowa Analiza Danych Doświadczalnych**, wykład w latach: 2009, 2010, 2011, 2013, 2015, zajęcia laboratoryjne prowadzone w latach: 2005, 2016, 2007, 2008, 2010, 2011, 2013, 2014, 2015.
- Programowanie Urządzeń Mobilnych**, wykład oraz zajęcia laboratoryjne prowadzone w latach: 2015, 2016, 2017
- Wstęp do Fizyki Jądrowej**, wykład oraz ćwiczenia rachunkowe prowadzone w latach: 2016, 2017, 2018
- Zajęcia z fizyki w ramach programu **Foundation Course** dla obcokrajowców (w języku angielskim), prowadzone w latach 2015/16, 2016/17, 2017/18, 2018/19.
- Laboratorium Fizyki Jądrowej** w Centralnym Laboratorium Fizyki Wydziału Fizyki, zajęcia prowadzone w latach: 2009, 2010, 2011

##### ii) Popularyzacja nauki

- Warsztaty Master Class** – wykład „Dziwność - sygnatura plazmy kwarkowo-gluonowej”, zaprezentowany dla uczniów Szkół Ponadgimnazjalnych, prowadzony w latach: 2014, 2015, 2017

## **M) Opieka naukowa nad studentami**

**Liczba wypromowanych studentów:**

- studiów 1 stopnia: 14

- studiów 2 stopnia wynosi: 11

**Liczba studentów obecnie realizujących prace dyplomowe: 4**

**Liczba studentów odbywających praktykę: 10**

**Liczba doktorantów znajdujących się pod opieką: 8 (w tym 3 role promotora pomocniczego)**

### **i) Lista wypromowanych studentów studiów 1 stopnia (inżynierantów) na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej:**

1. K. Kulasiński - „Generator korelacji dwucząstkowych w modelu zderzeń ciężkich jonów – EPOS” - 2010
2. M. Szymański - „Korelacje cząstek nieidentycznych w zderzeniach jąder złota wygenerowanych przy użyciu modelu UrQMD” - 2011
3. S. Siejka - „Budowa systemu informatycznego do wyznaczania dwucząstkowych rozkładów pędowych w ramach eksperymentu STAR przy użyciu modeli teoretycznych” - 2014
4. K. Brzeziński - „Opracowanie metody do wyznaczenia parametrów modelu Therminator w zderzeniach jonów złota przy energiach 7.7, 19.6 oraz 27 GeV w ramach eksperymentu STAR” - 2014
5. P. Szymański - „Opracowanie metody do wyznaczenia parametrów modelu Therminator w zderzeniach jonów złota przy energiach sNN = 11.5; 39 oraz 62 GeV w ramach eksperymentu STAR” - 2014
6. D. Kostecki - „Opracowanie metody do generacji funkcji korelacyjnych” - 2015
7. M. Stefaniak - „Badanie zderzeń ciężkich jonów w ramach programu BES przy pomocy modelu EPOS” - 2015
8. D. Pawłowska - „Opracowanie metody do wyznaczania korelacji szczątkowych dla programu STAR BES” - 2016
9. F. Oleszczuk - „Opracowanie metody do wyznaczenia korelacji femtoskopowych przy użyciu detektora ”Heavy Flavor Tracker” w eksperymencie STAR” - 2016
10. M. Seniut - „Therminator generator adaption to the conditions of RHIC and FAIR experimental complexes” - 2017

11. J. Bielecki - „Opracowanie metody do wyznaczania korelacji szczątkowych proton-antyproton dla programu STAR BES” - 2017
12. P. Kowaleczko - „Stworzenie oprogramowania do wyznaczania korelacji szczątkowych dla eksperymentu STAR przy użyciu detektora Heavy Flavor Tracker” - 2017
13. G. Pokropska - „Stworzenie oprogramowania do analizy femtoskopowych korelacji  $\Delta\phi\Delta n$  par mezon-mezon, barion-barion i mezon-barion dla zderzeń Au+Au przy energii  $\sqrt{(S_{nn})} = 39$  GeV w eksperymencie STAR” - 2018
14. T. Lehmann - „Stworzenie oprogramowania do analizy femtoskopowych korelacji  $\Delta\phi\Delta n$  par mezon-mezon, barion-barion i mezon-barion dla zderzeń p+p przy energii  $\sqrt{(S_{nn})} = 200$  GeV w eksperymencie STAR” - 2018

**ii) Lista wypromowanych studentów studiów 2 stopnia (magistrantów) na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej:**

1. A. Mazurek - „Ocena możliwości pomiarów korelacji dwubarionowych w eksperymencie ALICE” - 2010
2. D. Lazurek - „Przewidywania teoretyczne i wyniki eksperymentalne pomiarów korelacyjnych w eksperymencie STAR” - 2011
3. M. Szymański - „Analiza korelacji dwubarionowych w eksperymencie ALICE” - 2012
4. K. Poniatowska - „Rezultaty eksperymentalne pomiarów korelacji cząstek nieidentycznych w eksperymencie STAR” - 2013
5. K. Szkudlarek - „Rezultaty eksperymentalne pomiarów korelacji cząstek nieidentycznych w eksperymencie STAR” - 2013
6. S. Siejka - „Wyniki pomiarów korelacji proton-proton w eksperymencie STAR” - 2015
7. P. Szymański - „Badanie korelacji dwucząstkowych układu hadron-hadron przy użyciu generatora Therminator” - 2016
8. M. Stefaniak - „Examination of the heavy ion collisions using EPOS model in frame of BES program” - 2016
9. D. Kostecki - „Poszukiwanie optymalnego generatora zderzeń ciężkich jonów przy niskich energiach” - 2017
10. D. Pawłowska - „Badanie zderzeń ciężkich jonów przy pomocy femtoskopowych korelacji układu dwóch protonów” - 2017
11. K. Kulesz - „Damage limits of superconducting magnet components due to beam impact and exposition to high temperatures”, 2018 – praca realizowana w systemie współpracy z CERN

iii) **Lista studentów obecnie realizujących prace inżynierskie na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej:**

1. P. Kopaczewski - „Stworzenie oprogramowania do analizy femtoskopowych korelacji  $\Delta\phi\Delta n$  par barion-barion dla zderzeń Au+Au przy energii  $\sqrt{(S_{nn})} = 39$  GeV w eksperymencie STAR”
2. A. Badełek - „Opracowanie metody do wyznaczenia parametrów modelu THERMINATOR 2 w zderzeniach jonów złota w ramach eksperymentu STAR”
3. J. Czerniawski - „Aplikacja mobilna na platformę Android do monitorowania danych pochodzących z Systemu Slow Control dla detektora TOF-MPD”

iv) **Lista studentów obecnie realizujących prace magisterskie na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej:**

1. G. Pokropska - „Analiza korelacji femtoskopowych z generatora Therminator”.

v) **Opiekun praktyk na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej:**

1. M. Girard -2009 (6 miesiące)
2. E. Servais– 2009 (3 miesiące)
3. C. Couturier- 2010 (2 miesiące)
4. K. Poniatońska – 2010 (1 miesiąc)
5. K. Szkudlarek – 2010 (1 miesiąc)
6. S. Siejka – 2013 (1 miesiąc)
7. P. Szymański – 2013 (1 miesiąc)
8. K. Brzeziński – 2013 (1 miesiąc)
9. M. Stefaniak – 2014 (1 miesiąc)
10. D. Pawłowska – 2015 (1 miesiąc)

vii) **Opieka naukowa nad studentami studiów 3 stopnia (doktorantami) w charakterze opiekuna naukowego lub promotora pomocniczego**

1. P. Ostrowski, 2011-2012, Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska, **promotor pomocniczy**
2. M. Girard, 2012-2017, Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska, **promotor pomocniczy**
3. K. Poniatońska, 2013-2015, Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska, opiekun naukowy
4. S. Siejka, 2015-2018, Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska, opiekun naukowy

5. M. Stefaniak, 2017-2018, Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska, opiekun naukowy – praca realizowana w systemie współopieki z IMT Nantes (Francja).
6. D. Wielanek, 2016-2018, Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska, **promotor pomocniczy**
7. P. Szymański, 2016-2018, Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska, opiekun naukowy
8. D. Pawłowska, 2017-2018, Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska, opiekun naukowy

**N) Inne osiągnięcia, nie wymienione w pkt III A – III M**

- i. Twórca i administrator witryny internetowej Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej:  
<http://www.fizyka.pw.edu.pl>

*Anna Paulina Bronczyk*