

Załącznik nr 2a do wniosku o wszczęcie postępowania habilitacyjnego - autoreferat w języku polskim

## Autoreferat

na podstawie cyklu prac na temat "Badanie fluktuacji dynamicznych w zderzeniach ciężkich relatywistycznych jonów"

### 1 Curriculum Vitae

**Profil:** adiunkt na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej (PW), Zakład Fizyki Jądrowej. Uczestniczka eksperymentów NA49 oraz NA61/SHINE przy akceleratorze SPS (*Super Proton Synchrotron*) w Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych (CERN)

#### Katarzyna Grebieszko

**data i miejsce urodzenia:** 20 XII 1976 rok, Mińsk Mazowiecki

**adres:** Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska, Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

**telefon, e-mail:** +48 22 234 58 51, kperl@if.pw.edu.pl

#### Wykształcenie

**2000 - 2005** studia doktoranckie w Instytucie Fizyki Doświadczalnej na Uniwersytecie Warszawskim (IFD UW), Zakład Fizyki Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych; doktorat (obrona w czerwcu 2005) z zakresu fizyki oddziaływań ciężkich jonów

**1995 - 2000** studia na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego; praca magisterska w Zakładzie Fizyki Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych

**1991 - 1995** Liceum Ogólnokształcące w Mińsku Mazowieckim, profil biologiczno-chemiczny

#### Dodatkowe kwalifikacje (kursy i seminaria)

**2003** uzyskanie uprawnień pedagogicznych do wykonywania zawodu nauczyciela; w ramach kursu zaliczono przedmioty: Pedagogika, Dydaktyka Fizyki, Pracownia Dydaktyki Fizyki, Psychologia oraz praktyki pedagogiczne

**2002** (VIII/IX) udział w Europejskiej Szkole Fizyki Wysokich Energii (*The 2002 European School of High-Energy Physics*), Pylos (Grecja)

**2000** (VI - VIII) uczestnictwo w szkole letniej w ośrodku CERN pod Genewą (*Summer Student Programme*); praca dla eksperymentu NA49

*Kgreb*

## Praca naukowa

- 2009 (XI) - dotychczas** koordynatorka całości analiz w programie jonowym eksperymencie NA61/SHINE (cotygodniowe spotkania internetowe, nadzorowanie prac międzynarodowego zespołu)
- 2000 - dotychczas** uczestniczka eksperymentu NA49 w CERN (od 2005 również NA61); zbieranie i analiza danych (główny temat prac to badanie fluktuacji dynamicznych w różnych charakterystykach cząstek produkowanych podczas zderzeń ciężkojonowych), rezultaty wielokrotnie pokazywane na spotkaniach grup NA49 i NA61 oraz na międzynarodowych konferencjach m.in. Quark Matter, Critical Point and Onset of Deconfinement, Strangeness in Quark Matter, Hot Quarks, Mazurian Lakes Conference (tzw. wykład zaproszony), etc. Szereg publikacji zawierających zarówno oficjalne wyniki eksperymentów NA49 i NA61 jak i rezultaty własnych analiz teoretycznych. Publikacje w czasopismach: Phys. Rev. C, Nucl. Phys. A, Acta Phys. Polon. B, Cent. Eur. J. Phys., Proc. of Science, J. Phys.: Conf. Ser., etc.
- 2012 (VI)** Medal Młodego Uczzonego za wybitne osiągnięcia w badaniu relatywistycznych zderzeń jądrowych
- 2009 (IX)** Nagroda Indywidualna II stopnia JM Rektora PW za osiągnięcia naukowe w latach 2007-2008
- 2002 (XII)** Nagroda Dyrekcji Instytutu Fizyki Doświadczalnej dla wyróżniających się doktorantów
- 2002 (III)** Stypendium im. Jerzego Pniewskiego w Instytucie Fizyki Doświadczalnej (co-rocennie przyznawane stypendium dla wyróżniającego się asystenta lub doktoranta)

## Praca dydaktyczna

- 2006 - dotychczas** adiunkt na Wydziale Fizyki PW. Prowadzone przedmioty: "Fizyka Zderzeń Ciężkich Jonów" (od roku 2007/2008) - wykład dla magistrantów oraz doktorantów, "Podstawy Technologii Informacyjnej" (od roku 2006/2007) - laboratoria komputerowe oraz całość opieki nad przedmiotem, „Laboratorium Fizyki I” (od roku 2006/2007), etc.
- 2007 - dotychczas** oficjalna opiekunka pięciu ukończonych prac magisterskich, konsultantka wielu innych prac w tym przygotowywanych obecnie prac doktorskich
- 2008** wykłady dla uczniów szkół średnich na temat fizyki cząstek elementarnych oraz fizyki zderzeń ciężkich jonów
- 2000 - 2002** prowadzenie ćwiczeń do wykładów: "Fizyka IA" oraz "Programowanie I" (C++) na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
- 2001 oraz 2002** wyróżnienia za prowadzenie zajęć dydaktycznych na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

## Inne informacje

2008/2009 - **dotychczas** członek Komisji Dydaktycznej na Wydziale Fizyki PW

sem. zimowy 2008/2009 oraz sem. letni 2010/2011 - **dotychczas** rola Sekretarza Komisji Egzaminów Magisterskich (dla specjalności Fizyka Komputerowa / Fizyka i Technika Jądrowa)

2005/2006 - **dotychczas** uczestnictwo w pracach Wydziałowej Komisji Rekrutacyjnej

2011 (II) organizacja spotkania grupy NA61/SHINE na Wydziale Fizyki PW

2010 (II) koordynacja organizacji spotkania grupy NA49 na Wydziale Fizyki PW

## Znajomość języków obcych

angielski - płynny w mowie i piśmie

rosyjski - poziom elementarny

## Znajomość komputera

języki i środowiska: C++, C, Fortran, HTML, xhtml, css, LaTeX, ROOT

systemy operacyjne: Linux, Windows oraz pakiety oprogramowania

## 2 Fizyka zderzeń ciężkich jonów

Moja działalność naukowa związana jest z fizyką zderzeń ciężkich relatywistycznych jonów. W swoich analizach wykorzystuję zarówno modele teoretyczne jak i dane doświadczalne zebrane w ramach realizacji eksperymentów NA49 [1, 2] oraz jego następcy NA61/SHINE [3] przy akceleratorze SPS (*Super Proton Synchrotron*) w Europejskim Laboratorium Badań Jądrowych (CERN) [4]. Głównym tematem prowadzonych przeze mnie badań jest analiza mechanizmów reakcji jądrowych w obszarze energii ultra-relatywistycznych, kiedy zderzające się jądra atomowe poruszają się z prędkościami bardzo bliskimi prędkości światła. Przy tak wysokich energiach oczekiwane jest przejście ze stanu materii hadronowej do stanu, w którym "uwolnione" zostają kwarki i gluony. Stan ten nazywany jest plazmą kwarkowo-gluonową (*quark-gluon plasma*, QGP). Całokształt otrzymanych dotychczas wyników sugeruje, że QGP naprawdę pojawia się w trakcie zderzenia ciężko-jonowego, jeśli system jest wystarczająco gorący i gęsty. Zarówno sam typ przejścia fazowego między materią hadronową a QGP (pierwszy, drugi rodzaj lub inne) jak i własności kreowanej materii są przedmiotem analiz w wielu ośrodkach na świecie ze względu na ogromne znaczenie poznawcze, związane z fundamentalnymi własnościami materii oraz wczesnymi fazami ewolucji wszechświata (QGP najprawdopodobniej istniała zaraz po Wielkim Wybuchu; ściślej przez jedną do kilku pierwszych mikrosekund).

Eksperyment NA49 znalazł granicę energetyczną (minimalną energię zderzenia) przy której następuje przejście fazowe do QGP, badając zderzenia ciężkich jonów ołowiu. Energia ta odpowiada pośrednim energiom dostępnym w akceleratorze SPS [5, 6]. W skali

makroskopowej odkrycie to można porównać do znalezienia temperatury wrzenia wody, rzecz dotyczy jednak materii jądrowej, gdzie całość tworzonego po zderzeniu systemu „żyje” około  $10^{-23}$  sekundy, ma rozmiar około  $10^{-14}$  metra, a temperatury są rzędu 100 000 razy temperatura wnętrza Słońca. Celem naszych badań w eksperymencie NA61/SHINE będzie między innymi sprawdzenie czy dla mniejszych systemów ( $Be + Be$ ,  $Ar + Ca$ ,  $Xe + La$ ), przy podobnych energiach zderzenia, również istnieje możliwość przejścia do QGP.

Diagram fazowy silnie oddziałującej materii najczęściej przedstawiany jest przy użyciu temperatury  $T$  oraz barionowego potencjału chemicznego  $\mu_B$ . Uważa się, że diagram fazowy materii jądrowej, podobnie jak w przypadku wody, ma tak zwany punkt krytyczny (CP) gdzie kończy się przejście pierwszego rodzaju. Większość przewidywań teoretycznych sugeruje, że dla dużych wartości  $\mu_B$  przejście fazowe jest pierwszego rodzaju i kończy się w punkcie krytycznym, w którym to punkcie przejście jest drugiego rodzaju. Za punktem krytycznym (w stronę małych wartości  $\mu_B$ ) mamy do czynienia z gwałtownym ale ciągłym przejściem zwanym *cross-over*. Obliczenia na sieciach (*lattice QCD*) pokazują, że CP może być zlokalizowany w obszarze energii dostępnym w akceleratorze SPS w CERN, np.  $T^{CP} = 162 \pm 2$  MeV,  $\mu_B^{CP} = 360 \pm 40$  MeV [7] lub  $(T^{CP}, \mu_B^{CP}) = (0.927(5)T_c, 2.60(8)T_c) = (\sim 157, \sim 441)$  MeV [8], gdzie  $T_c$  jest temperaturą krytyczną przejścia gaz hadronowy  $\leftrightarrow$  QGP liczoną przy zerowych wartościach potencjału chemicznego. Zgodnie z sugestiami teoretyków punkt krytyczny można znaleźć badając między innymi tak zwane fluktuacje niestatystyczne (dynamiczne) w charakterystykach (ilości, rodzaje, pędy, energie, kąty emisji, etc.) cząstek tworzonych w końcowym stanie zderzenia jądro+jądro (stan QGP jest bardzo nietrwały a więc uwolnione kwarki i gluony finalnie łączą się, czyli hadronizują, w bardziej złożone cząstki – mezony  $\pi$ , protony, mezony  $K$ , itp., które to cząstki obserwujemy w układach detekcyjnych).

### 3 Fluktuacje dynamiczne

Analiza fluktuacji dynamicznych, w różnych charakterystykach produkowanych cząstek, jest ważnym narzędziem przy poszukiwaniu granic przejść fazowych oraz punktu krytycznego silnie oddziałującej materii. Blisko energii granicznej na przejście fazowe gwałtownie zmienia się równanie stanu. Może to znaleźć odzwierciedlenie w zależności różnego typu fluktuacji od energii. Najnowsze obliczenia na sieciach (praca przeglądowa [9]) sugerują, że fluktuacje i korelacje mogą stanowić czułą sondę uwolnienia w związku z faktem, że fluktuacje są wrażliwe na stopnie swobody, które to mogą być hadronowe lub partonowe. Jako konsekwencję uwolnienia obserwuje się w obliczeniach na sieciach nagły wzrost między innymi fluktuacji dziwności oraz fluktuacji liczby lekkich kwarków w obszarze przejścia do QGP czyli dla temperatur  $T = 160 - 200$  MeV.

Badanie fluktuacji i korelacji może również pomóc przy poszukiwaniu punktu krytycznego materii jądrowej. Zostało to zaproponowane w ścisłej analogii do zjawiska krytycznej opalescencji obserwowanej w większości cieczy. Opalescencja krytyczna, czyli rozpraszanie światła zachodzące na fluktuacjach gęstości ośrodka, narasta a następnie maleje w miarę jak zbliżamy się a następnie oddalamy od punktu krytycznego. W fizyce zderzeń ciężkich jonów przewidziano znaczące fluktuacje między innymi w pędzie poprzecznym

oraz w krotności cząstek (liczba cząstek na oddziaływanie) dla systemów które wymrażają (tzw. wymrożenie chemiczne czyli koniec oddziaływań nieelastycznych) blisko punktu krytycznego [10]. Położenie punktu wymrożenia na diagramie fazowym materii jądrowej można zmieniać zmieniając energię zderzenia lub/i rozmiar zderzanych jąder [11] (zobacz też rysunki w pracach [P6, P9, P13]). Dlatego też poszukujemy niemonotonicznej zależności fluktuacji dynamicznych w funkcji kontrolnych parametrów takich jak energia, centralność, rozmiar zderzanych jonów. Niemonotoniczna zależność pojawi się wtedy, gdy zmiany tych parametrów powodują, że punkt wymrożenia jest dalej, bliżej i znowu dalej od punktu krytycznego. Maksymalny sygnał fluktuacyjny spodziewany jest wtedy, kiedy punkt wymrożenia jest jak najbliżej punktu krytycznego.

Jako, że eksperyment NA49 znalazł energię progową przejścia fazowego (*onset of deconfinement*) równą około  $30A$  GeV (energia w środku masy na parę zderzanych nukleonów  $\sqrt{s_{NN}} \approx 7.6$  GeV) to punktu krytycznego powinniśmy spodziewać się raczej przy wyższych energiach zderzenia (energia progowa przejścia fazowego odpowiada sytuacji gdy stan tuż po zderzeniu znajduje się na linii zmiany faz a wymrożenie ma miejsce nieco później czyli dla niższych wartości temperatur i gęstości; sygnatury punktu krytycznego mają z kolei być najlepiej widoczne wtedy gdy to wymrożenie chemiczne jest w okolicy punktu krytycznego a więc blisko linii zmiany faz).

Możliwość użycia fluktuacji dynamicznych przy badaniu energii przejścia fazowego oraz przy poszukiwaniu punktu krytycznego silnie oddziałującej materii stała się motywacją obszernego programu analiz fluktuacyjnych zarówno przy akceleratorze SPS jak i RHIC (*Relativistic Heavy Ion Collider*) w USA. Eksperyment NA49 pokazał niemonotoniczne zachowanie fluktuacji w pędzie poprzecznym oraz w krotności [P4] (oraz referencje tam podane) przy najwyższej energii akceleratora SPS. Ten intrygujący wynik może być pierwszym sygnałem CP. Dlatego też wysiłki NA49 będą kontynuowane w eksperymencie NA61/SHINE, gdzie planowany jest dwu-wymiarowy (energia i rozmiar systemu) skan diagramu fazowego [P13].

## 4 Spis prac stanowiących główne osiągnięcie naukowe

Głównym osiągnięciem naukowym, o znaczącym wkładzie w rozwój fizyki zderzeń ciężkich jonów, jest jednotematyczny cykl 14 prac doświadczalnych i teoretycznych, dotyczących fluktuacji dynamicznych w charakterystykach i zmiennych kinematycznych produkowanych cząstek. Tytuł cyklu prac to: **"Badanie fluktuacji dynamicznych w zderzeniach ciężkich relatywistycznych jonów"**. Istota mojego udziału w pracach NA49 i NA61/SHINE polegała na wdrożeniu specyficznego sposobu analizy danych doświadczalnych, polegającego na badaniu fluktuacji w pędzie poprzecznym (składowa pędu prostopadła do kierunku wiązki) dla cząstek emitowanych w relatywistycznych zderzeniach jądrowych. Stosowane przeze mnie metody stały się jednym z zasadniczych elementów badań współpracy NA49 i NA61 oraz elementem wymienionych w Autoreferacie publikacji. W oparciu o moje wyniki powstały również dwie duże prace eksperymentu NA49: publikacja [12] (pracę tę napisałam w czasie moich studiów doktoranckich) oraz [P3]; pierwsza z nich ma obecnie 76 cytowań (INSPIRE, 13.08.2012). W ostatnich latach do analiz fluk-

tuacji w pędzie poprzecznym dołączyłam analizę fluktuacji w kącie azymutalnym (kąąt w płaszczyźnie prostopadłej do osi wiązki) oraz analizę fluktuacji w składzie chemicznym czyli w rodzaju cząstek produkowanych w zderzeniach. Oba typy fluktuacji, podobnie jak fluktuacje w pędzie poprzecznym, były badane zarówno przy użyciu modeli teoretycznych jak i danych eksperymentu NA49 i NA61. Wyniki moich analiz przedstawione zostały w poniższych (recenzowanych) publikacjach:

**P1** K. Grebieszko (dla Kolaboracji NA49), “Event-by-event transverse momentum fluctuations in nuclear collisions at CERN SPS”, Proceedings of Science (PoS), Tom: CPOD07, Numer Artykułu: 022 (2007).

Mój wkład w przygotowanie tej publikacji polegał na wykonaniu wszystkich obliczeń (wyniki eksperymentalne oraz symulacje) oraz na napisaniu manuskryptu. Brałam również udział w zbieraniu danych w eksperymencie NA49 (w tym danych użytych na potrzeby tej pracy). Oceniam swój udział w przygotowaniu tej publikacji na 100%.

**P2** K. Grebieszko, “Influence of impact parameter fluctuations on transverse momentum fluctuations”, Physical Review C, Tom: 76, Numer Artykułu: 064908 (2007). Impact Factor (2007): 3.302.

Mój wkład w przygotowanie tej publikacji, polegający na wykonaniu wszystkich obliczeń oraz na napisaniu manuskryptu, wynosił 100%.

**P3** T. Anticic, ..., K. Grebieszko, ... (Kolaboracja NA49), “Energy dependence of transverse momentum fluctuations in Pb+Pb collisions at the CERN Super Proton Synchrotron (SPS) at 20A to 158A GeV”, Physical Review C, Tom: 79, Numer Artykułu: 044904 (2009). Impact Factor (2009): 3.477.

Mój wkład w przygotowanie tej publikacji polegał na wykonaniu wszystkich obliczeń dotyczących fluktuacji w pędzie poprzecznym w eksperymencie NA49, na porównaniu wyników z modelami oraz z wynikami innych eksperymentów, na interpretacji wyników oraz na napisaniu manuskryptu. Brałam również udział w zbieraniu danych w eksperymencie NA49 (w tym danych użytych na potrzeby tej pracy). Oceniam swój udział w przygotowaniu tej publikacji na 95%.

**P4** K. Grebieszko (dla Kolaboracji NA49), “Search for the critical point of strongly interacting matter in NA49”, Nuclear Physics A, Tom: 830, Strony: 547c-550c (2009). Impact Factor (2009): 1.706.

Mój wkład w przygotowanie tej publikacji polegał na wykonaniu kompilacji opublikowanych wyników eksperymentalnych pod kątem poszukiwania sygnatur punktu krytycznego silnie oddziałującej materii. W szczególności porównałam zmienne fluktuacyjne z modelem teoretycznym fluktuacji w obecności CP; porównanie uwzględniało ilościowe oszacowanie wpływu akceptacji kinematycznej NA49 na wartości modelowe. Wykonałam również niezbędne fity opublikowanych rozkładów mas poprzecznych, etc. Manuskrypt również został napisany przeze mnie. Wszystkie (opublikowane wcześniej) analizy dotyczące fluktuacji w pędzie poprzecznym wykonałam osobiście. Brałam również udział w zbieraniu danych w eksperymencie NA49 (w tym

danych użytych na potrzeby tej pracy). Oceniam swój udział w przygotowaniu tej publikacji na 100%.

- P5** K. Grebieszko (dla Kolaboracji NA49 i NA61/SHINE), "Search for the QCD critical point at SPS energies", Proceedings of Science (PoS), Tom: EPS-HEP 2009, Numer Artykułu: 030 (2009).

Mój wkład w przygotowanie tej publikacji polegał na wykonaniu wszystkich obliczeń dotyczących fluktuacji w pędzie poprzecznym, na porównaniu fluktuacji w pędzie poprzecznym i krotności z modelem zakładającym istnienie punktu krytycznego silnie oddziałującej materii oraz na napisaniu manuskryptu. Brałam również udział w zbieraniu danych w eksperymencie NA49 (w tym danych użytych na potrzeby tej pracy). Oceniam swój udział w przygotowaniu tej publikacji na 100%.

- P6** K. Grebieszko (dla Kolaboracji NA49 i NA61), "NA49 and NA61/SHINE experiments: Results and perspectives", Acta Physica Polonica B, Tom: 41, Strony: 427-439 (2010). Impact Factor (2010): 0.671.

Mój wkład w przygotowanie tej przeglądowej publikacji polegał na dyskusji opublikowanych w ostatnich latach wyników eksperymentalnych, w tym tych otrzymanych przeze mnie (te same co w pracy [P5]). Manuskrypt również przygotowałam osobiście. Oceniam swój udział w przygotowaniu tej publikacji na 100%.

- P7** T. Cetner, K. Grebieszko (dla Kolaboracji NA49), "Fluctuations of the azimuthal particle distribution in NA49 at the CERN SPS", Journal of Physics: Conference Series, Tom: 270, Numer Artykułu: 012023 (2011).

Mój wkład w przygotowanie tej publikacji polegał na wykonaniu wszystkich obliczeń dotyczących fluktuacji w kącie azymutalnym w eksperymencie NA49, na wykonaniu dużej części obliczeń modelowych (przepływ eliptyczny i jego fluktuacje, symulacje w modelu UrQMD1.3) oraz na częściowym napisaniu manuskryptu. Brałam również udział w zbieraniu danych w eksperymencie NA49 (w tym danych użytych na potrzeby tej pracy). Oceniam swój udział w przygotowaniu tej publikacji na 80%.

- P8** T. Cetner, K. Grebieszko, S. Mrówczyński, "Deciphering azimuthal correlations in relativistic heavy-ion collisions", Physical Review C, Tom: 83, Numer Artykułu: 024905 (2011). Impact Factor (2011): 3.308.

Mój wkład w przygotowanie tej publikacji polegał na wykonaniu dużej części obliczeń modelowych (między innymi badanie wpływu przepływu eliptycznego oraz jego fluktuacji, analiza wpływu rozpadu rezonansów, testy w ramach modelu HIJING, przygotowanie symulacji w modelu UrQMD3.3), na kierowaniu częścią pozostałych analiz oraz na częściowym napisaniu manuskryptu (fragmenty wstępu, podsumowania, fragmenty dotyczące moich analiz). Oceniam swój udział w przygotowaniu tej publikacji na 70%.

- P9** T. Cetner, K. Grebieszko (dla Kolaboracji NA61), "Methods to study event-by-event fluctuations in the NA61/SHINE experiment at the CERN SPS", Physics of Atomic Nuclei, Tom: 75, Strony: 567-570 (2012). Impact Factor (2011): 0.568.

Mój wkład w przygotowanie tej publikacji polegał na wykonaniu dużej części obliczeń (w tym napisanie i przetestowanie kodu do poprawek o których mowa w pracy) oraz na napisaniu większości manuskryptu. Brałam również udział w zbieraniu danych w eksperymencie NA61/SHINE (w tym danych użytych na potrzeby tej pracy). Oceniam swój wkład w przygotowanie tej publikacji na 70%.

- P10** M. Gaździcki, K. Grebieszko, M. Maćkowiak, S. Mrówczyński, "Identity method to study chemical fluctuations in relativistic heavy-ion collisions", *Physical Review C*, Tom: 83, Numer Artykułu: 054907 (2011). Impact Factor (2011): 3.308.

Mój wkład w przygotowanie tej publikacji polegał na wykonaniu części obliczeń (głównie symulacje) oraz na napisaniu dużej części manuskryptu (głównie wstęp, opis zmiennych fluktuacyjnych, efekt błędnej identyfikacji oraz procedura eksperymentalna). Przetestowałam na symulacjach między innymi wpływ pogarszającej się identyfikacji cząstek na pomiar zmiennych fluktuacyjnych (zob. Rys. 1 i 2). Zapoczątkowałam również analizę fluktuacji chemicznych przy użyciu zmiennych  $\Phi$  i  $\Psi$  w eksperymencie NA49 (wstępne wyniki były powodem wprowadzenia opisanej w pracy metody tożsamości). Przeprowadziłam również wiele testów (na danych NA49 i przy użyciu tzw. szybkich generatorów) zachowania się różnych zmiennych mierzących fluktuacje chemiczne; ich wyniki nie zostały ostatecznie dołączone do publikacji ale były kluczowe przy proponowaniu nowej metody. Oceniam swój udział w przygotowaniu tej publikacji na 70%.

- P11** K. Grebieszko, S. Mrówczyński, "Integrated azimuthal correlations in nucleus-nucleus collisions at CERN SPS", *Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement*, Tom: 5, Strony: 727-732 (2012).

Mój wkład w przygotowanie tej publikacji polegał na wykonaniu całości obliczeń modelowych (w ramach modelu UrQMD oraz tzw. szybkiego generatora) oraz na uczestnictwie w redagowaniu manuskryptu. Oceniam swój udział w przygotowaniu tej publikacji na 70%.

- P12** K. Grebieszko (dla Kolaboracji NA49), "Report from NA49", *Acta Physica Polonica B*, Tom: 43, Strony: 609-618 (2012). Impact Factor (2011): 0.901.

Mój wkład w przygotowanie tej publikacji polegał na dyskusji opublikowanych wcześniej wyników eksperymentu NA49, oraz tych otrzymanych przeze mnie, jeszcze nie publikowanych (tutaj głównie fluktuacje w kącie azymutalnym). Manuskrypt również przygotowałam osobiście. Dodatkowo brałam udział w zbieraniu danych w eksperymencie NA49 (w tym danych użytych na potrzeby tej pracy). Oceniam swój udział w przygotowaniu tej publikacji na 70%.

- P13** K. Grebieszko (dla Kolaboracji NA61/SHINE), "Status and plans of the ion program of NA61 at the CERN SPS", praca zaakceptowana przez *Central European Journal of Physics*, publikacja "online": DOI:10.2478/s11534-012-0059-2, wersja drukowana publikacji planowana na październik 2012.

Mój wkład w przygotowanie tej publikacji polegał na napisaniu całości manuskryptu, programów do liczenia zmiennych fluktuacyjnych oraz na kierowaniu wszystkimi

opisanymi w pracy analizami. Brałam również udział w zbieraniu danych w eksperymencie NA61/SHINE. Oceniam swój udział w przygotowaniu tej publikacji na 75%.

**P14** K. Grebieszko, “Testing new strongly intensive measures of transverse momentum fluctuations”, *Acta Physica Polonica B*, Tom: 43, Strony: 1333-1355 (2012). Impact Factor (2011): 0.901.

Mój wkład w przygotowanie tej publikacji, polegający na wykonaniu wszystkich obliczeń oraz na napisaniu manuskryptu, wynosił 100%.

Chciałabym również dodać, że wszystkie wyniki pokazane w pracach [P1-P14], dotyczące pomiarów zmiennej  $\Phi$  (dla fluktuacji pędu poprzecznego, kąta azymutalnego, fluktuacji chemicznych), zmiennej  $\Psi$  oraz  $\nu_{dyn}$  (dla fluktuacji chemicznych), zmiennych  $\Delta$  i  $\Sigma$  (dla fluktuacji w pędzie poprzecznym), korelacji dwucząstkowych w zmiennej kumulatywnej  $x$  (dla fluktuacji w pędzie poprzecznym), zostały obliczone przy użyciu programów, które napisałam osobiście.

Publikacje [P1-P14] wraz z oświadczeniami współautorów znajdują się w oddzielnych załącznikach.

## 5 Fluktuacje w pędzie poprzecznym

Fluktuacje średniego pędu poprzecznego, mierzone metodą zderzenia po zderzeniu (tzw. przypadek po przypadku), niosą bardzo ważne informacje o zderzeniu ciężko-jonowym. Pozwalają określić np. stopień równowagi termicznej osiąganą w zderzeniach. Przewidziano również teoretycznie [10], że niemonotoniczna zależność fluktuacji dynamicznych w pędzie poprzecznym oraz w krotności (liczba cząstek na zderzenie) w funkcji rozmiaru systemu lub/i energii może potwierdzić istnienie punktu krytycznego. Eksperyment NA49 zbadał fluktuacje w pędzie poprzecznym używając zmiennej  $\Phi_{p_T}$  [12], [P3]. Znalaziono bardzo ciekawy wynik w postaci niemonotonicznej zależności fluktuacji w  $p_T$  od rozmiaru zderzanego systemu [12]. Analiza fluktuacji w pędzie poprzecznym będzie kontynuowana w eksperymencie NA61, gdzie zderzane są / będą różne systemy, między innymi  $p + p$ ,  $Be + Be$ ,  $Ar + Ca$  oraz  $Xe + La$  przy sześciu różnych energiach (od 13 do 158 GeV na nukleon pocisku). Taki dwuwymiarowy skan (rozmiar systemu i energia) być może pozwoli na znalezienie punktu krytycznego silnie oddziałującej materii w obszarze energii akceleratora SPS.

Badanie fluktuacji dynamicznych w pędzie poprzecznym rozpoczęłam na studiach doktoranckich. Otrzymane przeze mnie wyniki weszły w skład mojej rozprawy doktorskiej i zostały opublikowane przez eksperyment NA49 w pracy [12]. W pracy tej badałam zależność fluktuacji w pędzie poprzecznym od rozmiaru zderzanego systemu ( $p + p$ ,  $C + C$ ,  $Si + Si$  oraz różne centralności zderzeń  $Pb + Pb$ ) dla najwyższej energii akceleratora SPS (wiązka o energii 158 GeV na nukleon pocisku, energia dostępna w środku masy na parę zderzanych nukleonów  $\sqrt{s_{NN}} \approx 17.3$  GeV). Badania przeprowadziłam dla trzech różnych kombinacji ładunków: wszystkie cząstki naładowane, ujemnie naładowane oraz dodatnio naładowane. W analizach używałam trzech sposobów badania fluktuacji w pędzie poprzecznym metodą przypadek po przypadku. Pierwszą z nich była analiza rozkładu

średniego pędu poprzecznego w zderzeniu  $M(p_T)$  i porównanie go z podobnym rozkładem dla tak zwanych przypadków (zderzeń) mieszanych, gdzie jedynym rodzajem obecnych fluktuacji są fluktuacje statystyczne. Drugą użytą metodą była analiza zmiennej  $\Phi_{p_T}$ . Obserwabla  $\Phi$  [13] (w ogólności może być ona zastosowana do różnych zmiennych kinematycznych i charakterystyk cząstek na przykład pęd poprzeczny, ładunek, kąt azymutalny) jest zmienną silnie intensywną co oznacza, że w modelu superpozycji (np. Model Zranionych Nukleonów [14]) nie zależy od liczby oraz od fluktuacji liczby "źródeł" (np. zranione nukleony w Modelu Zranionych Nukleonów) tworzących zderzenia jądro+jądro ( $A + A$ ). W modelach termodynamicznych zmienne silnie intensywne nie zależą od objętości oraz fluktuacji objętości systemu. W zderzeniach ciężkich jonów używanie silnie intensywnych zmiennych może być istotnym remedium na niedoskonałości związane z wyborem centralności zderzenia  $A + A$  (zobacz dyskusję problemu w [P14]). W szczególności używając tego typu zmiennych nie trzeba ograniczać się do bardzo wąskich przedziałów centralności. Trzecią, opisaną w pracy [12] metodą, była analiza korelacji dwu-cząstkowych przy użyciu kumulacyjnej zmiennej pędu poprzecznego  $x$  [12]. Analiza taka pozwala określić potencjalne źródło korelacji na przykład efekty związane ze statystyką Bose-Einsteina czy efekty oddziaływania Coulombowskiego (zobacz [12], [P1, P3]).

Te same trzy metody, opracowane dla potrzeb publikacji [12], były również wykorzystywane w późniejszych pracach [P1, P3], gdzie analizowałam zależność fluktuacji w pędzie poprzecznym od energii. Pierwotne analizy [P1] pokazały dość nieoczekiwany wynik. Zmienna  $\Phi_{p_T}$  dla dodatnich i wszystkich naładowanych cząstek miała podwyższone wartości dla niskich energii akceleratora SPS. Ujemne cząstki nie pokazywały żadnej zależności od energii. Pierwsze próby zrozumienia przyczyn tego zachowania, na podstawie analiz w ramach modelu UrQMD [15], były pokazane w pracy [P1]. Dodatkowo powstała niezależna praca [P2], w której znacznie szerzej zostało wytłumaczone, że dla zderzeń które nie są ściśle centralne mamy do czynienia z fluktuacjami parametru zderzenia (konkretnie korelacją między liczbą nukleonów w przednim obszarze pośpieszności oraz tych w obszarze centralnym). Jeśli akceptancja kinematyczna, tak jak w przypadku analiz NA49, ograniczona jest do przedniego obszaru pośpieszności, efekt ten powoduje zwiększone wartości  $\Phi_{p_T}$  dla dodatnich i wszystkich naładowanych cząstek. W pracy [P2] zaproponowano dwie metody pozbycia się wyżej opisanego efektu. Jedną z nich to ograniczenie się do dużo bardziej centralnych zderzeń a druga to dodatkowe cięcia na pośpieszność cząstek, wykluczające obszar bliski pośpieszności wiązki (NA49 zastosował tę drugą metodę [P3]). Praca [P2] stanowi istotną wskazówkę nie tylko dla eksperymentu NA49 ale również dla innych eksperymentów, które mogą mieć w jakiś sposób ograniczoną akceptancję w pośpieszności. Jako, że większość eksperymentów badających fluktuacje w pędzie poprzecznym robi to wyłącznie dla wszystkich naładowanych cząstek, w pracy [P2] dodatkowo podkreśliłam potrzebę przeprowadzania analiz dla różnych kombinacji ładunkowych cząstek (wszystkie naładowane, ujemne, dodatnie) co pozwoli zauważyć i wykluczyć trywialne efekty związane z fluktuacjami parametru zderzenia.

Końcowe wyniki dotyczące zależności fluktuacji w pędzie poprzecznym od energii (20, 30, 40, 80 oraz 158 GeV/nukleon pocisku) dla centralnych zderzeń  $Pb + Pb$  pokazałam w pracy [P3]. W obszarze energii SPS i w badanym obszarze pośpieszności (przedni obszar) fluktuacje pędu poprzecznego są małe i nie pokazują znaczącej zależności od energii. Badanie zmiennej kumulatywnej pędu poprzecznego  $x$  pokazało, że głównym efektem ko-

relacyjnym są korelacje krótko-zasięgowe związane z efektem statystyki kwantowej (HBT). Wartości zmiennej  $\Phi_{p_T}$  porównałam z wynikami innych eksperymentów (w tym przeliczenie zmiennej  $\Phi_{p_T}$  na zmienne fluktuacyjne używane w innych pracach), z przewidywaniami modelu UrQMD oraz z przewidywaniami modelu [10] zakładającego fluktuacje związane z istnieniem punktu krytycznego. W tym ostatnim modelu, w magnitudzie przewidywanego efektu CP, uwzględniłam ograniczoną akceptancję w pośpieszności oraz w kącie azymutalnym, użytą w analizach NA49. Porównanie danych NA49 z modelem fluktuacji w CP kontynuowałam w pracach [P4-P6], gdzie spodziewany efekt od CP w NA49 oszacowałam nie tylko dla fluktuacji w  $p_T$  (zależność od rozmiaru systemu i energii) ale również dla fluktuacji w krotności (zależność od rozmiaru systemu i energii). Na rysunkach użyłam jedynie centralnych zderzeń  $A + A$ . Zależność fluktuacji od rozmiaru systemu, zarówno w pędzie poprzecznym jak i w krotności, pokazuje maksimum dla zderzeń  $Si + Si$  oraz  $C + C$  przy najwyższej energii SPS. Maksimum to jest zgodne z przewidywaniami punktu krytycznego położonego w  $T \approx 178$  MeV oraz  $\mu_B \approx 250$  MeV. Co więcej, obserwowane maksimum, zarówno we fluktuacjach pędu poprzecznego jak i krotności, jest większe dla wszystkich cząstek naładowanych niż dla cząstek jednego znaku a efekt ten jest zgodny z przewidywaniami dotyczącymi fluktuacjami w pobliżu punktu krytycznego [10]. Dalsze analizy w eksperymencie NA61 być może pozwolą zbadać i potwierdzić znalezione w NA49 maksimum. Co ciekawe, zderzenia  $Si + Si$  przy 158A GeV pokazały maksimum również w analizie intermitencji pionów [16] oraz protonów [17]. W pracy [P4] pokazałam również inną obserwabłą, która mogłaby pomóc znaleźć punkt krytyczny silnie oddziałującej materii. W pracach [18] jako sygnaturę CP przewidziano spadek stosunku antybarionów do barionów wraz ze wzrostem pędu poprzecznego (masy poprzecznej). Na potrzeby pracy [P4] dokonałam wymaganych fitów opublikowanych wcześniej spektrów cząstek z eksperymentu NA49. Podobnie jak fluktuacje w pędzie poprzecznym oraz krotności, stosunek spektrów mas poprzecznych antybarionów do barionów nie pokazał żadnej znaczącej zależności od energii, która mogłaby być interpretowana jako sygnatura punktu krytycznego.

Przewidywania teoretyczne sugerują, że fluktuacje związane z punktem krytycznym powinny być zdominowane przez fluktuacje pionów o niskich pędach poprzecznych (poniżej 500 MeV/c) [10]. W związku z tym analizę zależności  $\Phi_{p_T}$  od energii powtórzyłam dla trzech różnych górnych cięć na pęd poprzeczny (750 MeV/c, 500 MeV/c, 250 MeV/c) [P1, P3]. Niestety, niskie pędy poprzeczne również nie pokazują znaczącej zależności od energii. Analizę zależności  $\Phi_{p_T}$  od rozmiaru systemu (centralne dane  $Pb + Pb$ ,  $Si + Si$ ,  $C + C$  oraz  $p + p$ ) powtórzyłam z kolei dla dwóch różnych obszarów  $p_T$  czyli  $p_T < 500$  MeV/c oraz  $p_T > 500$  MeV/c [P5, P6]. Wysokie pędy poprzeczne, zgodnie z przewidywaniami, nie pokazują żadnych efektów fluktuacyjnych, a dodatnie wartości  $\Phi_{p_T}$  są widoczne jedynie dla niskich pędów poprzecznych. Ciekawy jest fakt, że dla niskich  $p_T$  nie mamy już do czynienia z niemonotoniczną zależnością  $\Phi_{p_T}$  od rozmiaru systemu z maksimum dla  $Si + Si$  ale z ciągłym wzrostem od  $p + p$  do  $Pb + Pb$ . Efekt ten próbowałam wyjaśniać (nie opisane w publikacjach) zakładając większy wkład od korelacji krótko-zasięgowych (korelacje HBT) dla niższych  $p_T$  (efekt ten byłby lepiej widoczny dla zderzeń  $Pb + Pb$ ), jednak proste ograniczenia kinematyczne na czteropęd pary cząstek okazały się być zbyt restrykcyjne. W najbliższym czasie planuję napisać model symulujący efekt HBT i na podstawie tego modelu próbować wyjaśnić wartości  $\Phi_{p_T}$  obserwowane w NA49 dla niskich

pędów poprzecznych.

Analiza zmiennej  $\Phi_{p_T}$  jest obecnie kontynuowana w eksperymencie NA61 przez jednego z moich podopiecznych. Pierwsze przewidywania modelowe, dotyczące zmiennej  $\Phi_{p_T}$  w NA61, zrobiłam na potrzeby pracy [P1] a bardziej szczegółowe pokazałam w pracy [P14]. Jednymi z pierwszych danych zebranych w NA61 były zderzenia  $p + p$  przy wszystkich energiach akceleratora SPS. Jako, że w zderzeniach  $p + p$  w NA61 tarczę stanowił dwudziesto-centymetrowy cylinder z ciekłym wodorem prawdopodobieństwo oddziaływań wiązki poza tarczą (czyli na przykład ze ścianami cylindra) było duże. W związku z tym, razem z jednym ze swoich studentów, opracowaliśmy metodę poprawiania zmiennych fluktuacyjnych (zmienna  $\Phi$ , skalowana wariancja rozkładu krotności, etc.) na efekty oddziaływań poza tarczą. Metoda ta została opisana w pracy [P9] i jest obecnie stosowana w analizach eksperymentu NA61 do fluktuacji w pędzie poprzecznym, kącie azymutalnym oraz do fluktuacji krotności [P13].

Wspomniana wyżej miara  $\Phi_{p_T}$  odnosi się do drugiego momentu rozkładu pędu poprzecznego. Analiza wyższych momentów może dostarczyć dodatkowych informacji o układzie powstającym w zderzeniu. W szczególności wyższe momenty rozkładów różnych zmiennych kinematycznych mogą być bardziej wrażliwe na występowanie punktu krytycznego silnie oddziałującej materii. W ramach swoich analiz w eksperymencie NA49 przebadalam również trzeci moment fluktuacji pędu poprzecznego czyli zmienną fluktuacyjną  $\Phi_{p_T}^{(3)}$ , która, podobnie jak zmienna  $\Phi_{p_T}$ , jest silnie intensywna [19]. Określiłam zależność  $\Phi_{p_T}^{(3)}$  od rozmiaru zderzanego systemu ( $p + p$ ,  $C + C$ ,  $Si + Si$  oraz  $Pb + Pb$ ) przy najwyższej energii akceleratora SPS oraz zależność  $\Phi_{p_T}^{(3)}$  od energii (20, 30, 40, 80 oraz 158 GeV/nukleon pocisku) dla centralnych zderzeń  $Pb + Pb$ . Wyniki które otrzymałam pokazane były na kilku konferencjach, między innymi w pracach [20, 21, 22] oraz na slajdach z konferencji SQM 2011 (odpowiedni artykuł konferencyjny, jednak nie zawierający tych rysunków, to praca [P12]). Przewidywana większa wrażliwość wyższych momentów na ciekawe efekty fizyczne okazuje się być niestety powiązana z większą wrażliwością na fluktuacje statystyczne. Duże fluktuacje statystyczne, obecne przy pomiarze zmiennej  $\Phi_{p_T}^{(3)}$ , powodują, że nawet po użyciu całej dostępnej do tego celu statystyki zderzeń eksperymentu NA49 nie było możliwe wyciągnięcie końcowych wniosków co do natury zachowania się  $\Phi_{p_T}^{(3)}$ . Analiza zmiennej  $\Phi_{p_T}^{(3)}$  będzie kontynuowana w eksperymencie NA61, gdzie ilości zarejestrowanych oddziaływań będą znacznie wyższe niż w NA49. Dodatkowym problemem w analizie  $\Phi_{p_T}^{(3)}$  jest brak ilościowych przewidywań teoretycznych dotyczących wartości zmiennej  $\Phi_{p_T}^{(3)}$  dla systemów wymrażających blisko punktu krytycznego. Aktualnie trwają prace nad uzyskaniem takich przewidywań. W szczególności używam modelu opisanego w pracach [23] do obliczenia wartości obserwabli  $\Phi_{p_T}^{(3)}$ ,  $\Phi_{p_T}$ ,  $\Phi_\phi$ ,  $\Delta$ ,  $\Sigma$ , etc. (patrz niżej) w pobliżu punktu krytycznego. Pierwsze wyniki zostały już przedstawione grupie NA49.

Niedawno, w pracy [24], zaproponowano nowe zmienne fluktuacyjne  $\Delta$  oraz  $\Sigma$ , które, podobnie jak stosowana już przez NA49 zmienna  $\Phi$ , są silnie intensywne (nie zależą od objętości oraz od fluktuacji objętości systemu). Zmienne  $\Delta$  oraz  $\Sigma$  liczone są w oparciu o różne momenty rozkładów dlatego też mogą być w różny sposób wrażliwe na różne efekty fizyczne. Co więcej, w definicji nowych zmiennych  $\Delta$  oraz  $\Sigma$  można użyć dowolnych dwóch zmiennych ekstensywnych (w przeciwieństwie do intensywnych są one proporcjonalne do objętości systemu), podczas gdy w definicji zmiennej  $\Phi$  jedną z tych wielkości była zawsze krotność cząstek. Podobnie jak zmiennej  $\Phi$ , zmiennych  $\Delta$  oraz  $\Sigma$  można użyć do różnych

charakterystyk produkowanych cząstek na przykład pęd poprzeczny, kąt azymutalny. W pracy [P14] użyłam zmiennych  $\Delta$  i  $\Sigma$  do badania fluktuacji w pędzie poprzecznym. Wyniki porównałam z zachowaniem zmiennej  $\Phi$ . W pracy tej przeprowadziłam szereg testów zarówno przy użyciu tak zwanych szybkich generatorów cząstek (badałam między innymi efekt fluktuacji temperatury) jak i przy użyciu kompleksowego modelu UrQMD. W modelu UrQMD sprawdzałam między innymi wpływ cząstek pochodzących z twardych oddziaływań, wpływ cięć na pośpieszność oraz cięć na centralność zderzenia. Sprawdzałam również jaki wpływ ma wyrzucanie protonów z próbki. Testy w ramach modelu UrQMD dotyczyły systemów, które będą dostępne w programie jonowym eksperymencie NA61. Badanie zmiennych  $\Delta$  oraz  $\Sigma$  (zarówno przy użyciu pędu poprzecznego jak i kąta azymutalnego) jest na liście planów eksperymentu NA61.

## 6 Fluktuacje w kącie azymutalnym

Główną motywacją badania fluktuacji od przypadku do przypadku w kącie azymutalnym jest obserwacja niestabilności plazmy [25, 26], poszukiwanie punktu krytycznego silnie oddziałującej materii oraz badanie fluktuacji eliptycznego przepływu kolektywnego [27, 28]. Wraz z profesorem Stanisławem Mrówczyńskim oraz moim magistrantem Tomaszem Ceterem przetestowałam potencjalne możliwości analizy korelacji w kącie azymutalnym, metodą przypadek po przypadku, przy użyciu zmiennej  $\Phi_\phi$ . Rezultaty prac przedstawiłszy w publikacjach [P8] oraz [P7]. W opublikowanej pracy [P8] modelowano różne efekty powodujące korelacje w kącie azymutalnym, takie jak przepływ anizotropowy eliptyczny, fluktuacje przepływu eliptycznego, produkcję dżetów hadronowych (strumień cząstek powstałych z fragmentacji kwarku/gluonu), rozpady rezonansów oraz rolę zachowania pędu poprzecznego. Wykonaliśmy również testy w ramach modelu UrQMD, PYTHIA [29] oraz HIJING [30]. Moim wkładem w publikację [P8] (oraz [P7]) było między innymi zbadanie wpływu przepływu eliptycznego oraz jego fluktuacji, badanie wpływu rozpadu rezonansów, testy w ramach modeli HIJING i UrQMD1.3 oraz przygotowanie symulacji w modelu UrQMD3.3. Przeprowadzone przez nas obszerne symulacje modelowe pomogły zinterpretować uzyskane później wyniki doświadczalne.

Niezależnie od testów modelowych przeprowadziłam analizę zmiennej  $\Phi_\phi$  dla danych z eksperymentu NA49. Pierwsze wyniki pokazałam w pracy [P7], a w pracy [P12] oszacowałam dodatkowo niepewności systematyczne oraz porównałam wyniki NA49 z przewidywaniami modelu UrQMD (w modelu UrQMD uwzględniłam wpływ ograniczonej akceptancji detektora NA49). Podobnie jak w przypadku analizy zmiennej  $\Phi_{pT}$ , zmienna  $\Phi_\phi$  została policzona dla przedniego obszaru pośpieszności (tam akceptancja detektora NA49 jest najlepsza) i poprawiona na efekt skończonej rozdzielczości w rekonstrukcji dwóch śladów. W związku z tym, że akceptancja NA49 w kącie azymutalnym jest inna dla dodatnio i ujemnie naładowanych cząstek [P7], kąt azymutalny ujemnych cząstek został zdefiniowany tak, żeby rozkład kąta pokrywał się z tym dla dodatnio naładowanych cząstek (szczegóły w [P7]). Pozwoliło to na ilościowe porównywanie wartości  $\Phi_\phi$  dodatnio i ujemnie naładowanych cząstek ale uniemożliwiło badanie kombinacji wszystkich naładowanych cząstek. Dlatego też prace [P7] i [P12] pokazują  $\Phi_\phi$  dla dodatnio i ujemnie naładowanych cząstek. W publikacjach [P7] i [P12] badałam zależność zmiennej  $\Phi_\phi$  od rozmiaru zderzanego sys-

*Kla*

temu ( $p + p$ ,  $C + C$ ,  $Si + Si$  oraz 6 różnych klas centralności  $Pb + Pb$ ) dla najwyższej energii akceleratora SPS oraz zależność zmiennej  $\Phi_\phi$  od energii (20, 30, 40, 80 oraz 158 GeV/nukleon pocisku) dla centralnych zderzeń  $Pb + Pb$ . Dane NA49 nie pokazały żadnej znaczącej zależności  $\Phi_\phi$  od energii, natomiast zależność od rozmiaru systemu/centralności dla najwyższej energii akceleratora SPS pokazała maksimum dla peryferycznych zderzeń  $Pb + Pb$ . Moje późniejsze analizy w ramach tzw. szybkiego generatora (*fast generator*) pokazały [P11], że maksimum dla peryferycznych zderzeń  $Pb + Pb$  można wyjaśnić efektem przepływu eliptycznego oraz skierowanego. W symulacjach użyłam niezależnie zmierzonych wartości przepływów otrzymanych oddzielnie dla protonów oraz pionów w eksperymencie NA49. Procentowa zawartość protonów, w obszarze użytej w analizie akceptancji, została oszacowana przy użyciu modelu UrQMD. Na zakończenie warto dodać, że ograniczając analizę przy energii 158 GeV/nukleon pocisku do (semi)centralnych zderzeń ( $p + p$ ,  $C + C$ ,  $Si + Si$ , oraz najbardziej centralne  $Pb + Pb$ ) powodujemy, że efekty przepływu anizotropowego (skierowany i eliptyczny) stają się zaniedbywalne. Mimo tego, wartości  $\Phi_\phi$  dla ujemnie naładowanych cząstek wydają się być zwiększone dla zderzeń  $Si + Si$ , czyli tam gdzie zaobserwowano również zwiększone fluktuacje pędu poprzecznego oraz krotności [P4] oraz większe efekty intermitencyjne pionów [16] i protonów [17]. Trwające obecnie analizy zmiennej  $\Phi_\phi$  w eksperymencie NA61/SHINE z pewnością pozwolą rzucić nieco światła na istniejące wyniki NA49.

## 7 Fluktuacje w składzie chemicznym (rodzaju) produkowanych cząstek

Fluktuacje chemiczne, czyli fluktuacje składu (rodzaju) produkowanych w zderzeniach cząstek, były ostatnio badane zarówno przy akceleratorze SPS jak i RHIC. Dane eksperymentu NA49 pokazały między innymi silną zależność od energii oraz zmianę znaku we fluktuacjach przypadek po przypadku (zmienna  $\sigma_{dyn}$ ) mierzonych w stosunku naładowanych kaonów do naładowanych protonów (zobacz na przykład [P12]). Otrzymane rezultaty są bardzo ciekawe i mogą być w jakiś sposób powiązane z przejściem fazowym do QGP. Aby tę hipotezę potwierdzić potrzebujemy dalszych badań, niemniej jednak używane dotychczas w eksperymentach zmienne ( $\sigma_{dyn}$ ,  $\nu_{dyn}$ ) [P10] nie są wolne od technicznych problemów. Głównym z nich okazuje się być skończona rozdzielczość w identyfikacji cząstek (nie jesteśmy w stanie ze 100% pewnością stwierdzić czy dana cząstka to pion, kaon, elektron, itp.).

W roku 2010 testowałam wpływ pogarszającej się identyfikacji cząstek na zachowanie różnych zmiennych fluktuacyjnych (zobacz Rys. 2 w pracy [P10]). Jednak głównym sukcesem naszych badań, opisanych w publikacji [P10], było wprowadzenie i przetestowanie nowej metody badania fluktuacji w składzie chemicznym produkowanych cząstek tak zwanej metody tożsamości (*identity method*). Metoda ta całkowicie eliminuje potencjalne problemy związane z nieidealną identyfikacją cząstek. Jest to metoda całkowicie modelowo-niezależna, ponadto wymaga jedynie globalnych (a nie zderzenie po zderzeniu) fitów do rozkładów masy lub średnich strat jonizacyjnych cząstek (dwa najczęstsze sposoby identyfikacji cząstek to pomiar masy w detektorach czasu przelotu lub strat jonizacyjnych w komorach dryfowych/projekcji czasowej). Jako, że fity do rozkładów globalnych

(inkluzywnych) są zwykle dość dobrze znane w każdym eksperymencie, metoda ta jest więc dużo łatwiejsza w implementacji. Nowa metoda tożsamości (*identity method*) została przetestowana na modelach i wstępnie zastosowana do danych NA49 [31]. Rozszerzona wersja tej metody [32] zaczyna być stosowana również w eksperymencie NA61.

Oprócz badania fluktuacji chemicznych na danych eksperymentalnych bardzo istotne jest również przetestowanie różnych zmiennych fluktuacyjnych na modelach. Obecnie, wraz ze swoim magistrantem, zajmuję się badaniem zmiennych  $\nu_{dyn}$ ,  $\Phi$ ,  $\Psi$  oraz  $\Sigma$  dla fluktuacji między innymi kaonów w stosunku do pionów, kaonów w stosunku do protonów, protonów w stosunku do pionów. Analizy prowadzimy przy użyciu tzw. szybkich generatorów (modeluje się różne typy korelacji w systemie), danych z modelu HIJING oraz danych z modelu UrQMD. Część otrzymanych przeze mnie wyników (rezultaty szybkich generatorów, wyniki z modelu HIJING) zostanie pokazana we wstępie pracy magisterskiej studenta. Po zakończeniu analiz planowana jest również obszerna publikacja na temat wyżej wymienionych zmiennych.

## Literatura

- [1] <http://na49info.web.cern.ch/na49info/>
- [2] S. Afanasiev *et al.* (NA49 Collaboration), Nucl. Instrum. Methods **A430**, 201 (1999).
- [3] <https://na61.web.cern.ch/na61/xc/index.html>
- [4] <http://public.web.cern.ch/public/>
- [5] M. Gaździcki, M.I. Gorenstein, Acta Phys. Polon. B **30**, 2705 (1999).
- [6] S.V. Afanasiev, ..., K. Perl (Grebieszkow), ... *et al.* (NA49 Collaboration), Phys. Rev. **C66**, 054902 (2002);  
C. Alt, ..., K. Grebieszkow, ... *et al.* (NA49 Collaboration), Phys. Rev. **C77**, 024903 (2008).
- [7] Z. Fodor, S.D. Katz, J. High Energy Phys. **0404**, 050 (2004).
- [8] A. Li *et al.*, RIKEN-BNL Workshop On Fluctuations, Correlations and RHIC Low Energy Runs, Oct. 3-5 (2011), <http://www.bnl.gov/fcrworkshop/>
- [9] P. Petreczky, arXiv:1203.5320v1 [hep-lat].
- [10] M. Stephanov, K. Rajagopal, E.V. Shuryak, Phys. Rev. **D60**, 114028 (1999), and private communication.
- [11] F. Beccatini, J. Manninen, M. Gaździcki, Phys. Rev. **C73**, 044905 (2006).
- [12] T. Anticic, ..., K. Grebieszkow, ... *et al.* (NA49 Collaboration), Phys. Rev. **C70**, 034902 (2004).
- [13] M. Gaździcki, S. Mrówczyński, Z. Phys. **C54**, 127 (1992).

- [14] A. Białas, M. Bleszyński, W. Czyż, Nucl. Phys. **B111**, 461 (1976).
- [15] S.A. Bass *et al.*, Prog. Part. Nucl. Phys. **41**, 225 (1998);  
M. Bleicher *et al.*, J. Phys. G **25**, 1859 (1999).
- [16] T. Anticic, ... K. Grebieszko, ... *et al.* (NA49 Collaboration), Phys. Rev. **C81**, 064907 (2010).
- [17] F. Diakonos (for the NA49 Collaboration), proc. of CPOD 2011.
- [18] M. Askawa *et al.*, Phys. Rev. Lett **101**, 122302 (2008);  
X. Luo *et al.*, Phys. Lett. **B673**, 268 (2009).
- [19] S. Mrówczyński, Phys. Lett. **B465**, 8 (1999).
- [20] P. Seyboth, Nucl. Phys. **A862-863**, 54 (2011).
- [21] G.L. Melkumov, ..., K. Grebieszko, ... *et al.* (NA49 Collaboration), Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) **219-220**, 102 (2011).
- [22] G.L. Melkumov, ..., K. Grebieszko, ... *et al.* (NA49 Collaboration), Phys. Atom. Nucl. **75**, 556 (2012).
- [23] N.G. Antoniou *et al.*, Nucl. Phys. **A693**, 799 (2001);  
N.G. Antoniou *et al.*, Nucl. Phys. **A761**, 149 (2005).
- [24] M.I. Gorenstein, M. Gaździcki, Phys. Rev. **C84**, 014904 (2011).
- [25] S. Mrówczyński, Phys. Lett. **B314**, 118 (1993).
- [26] S. Mrówczyński, Acta Phys. Polon. B **39**, 1665 (2008).
- [27] S. Mrówczyński, E. Shuryak, Acta Phys. Polon. B **34**, 4241 (2003).
- [28] M. Miller, R. Snellings, arXiv:nucl-ex/0312008 [nucl-ex].
- [29] T. Sjostrand, S. Mrenna, P. Skands, Comput. Phys. Commun. **178**, 852 (2008).
- [30] M. Gyulassy, X.-N. Wang, Comput. Phys. Commun. **83**, 307 (1994).
- [31] M. Maćkowiak (for the NA49 Collaboration), Phys. Atom. Nucl. **75**, 651 (2012).
- [32] M.I. Gorenstein, Phys. Rev. **C84**, 024902 (2011).

*Katarzyna Bielecka*

*Warszawa, 17-08-2012*