

Politechnika Warszawska
Rada Naukowa Dyscypliny Nauki Fizyczne
(nazwa i dane adresowe podmiotu habilitującego,
wybranego do przeprowadzenia postępowania)
za pośrednictwem:
Rady Doskonałości Naukowej
pl. Defilad 1
00-901 Warszawa
(Pałac Kultury i Nauki, p. XXIV, pok. 2414)

Maja Maćkowiak-Pawłowska
(imię i nazwisko wnioskodawcy)

Politechnika Warszawska Wydział Fizyki
(miejsce pracy/jednostka naukowa)

Wniosek

z dnia 10.03.2026 r.

o przeprowadzenie postępowania w sprawie nadania stopnia doktora
habilitowanego w dziedzinie **nauk ścisłych i przyrodniczych** w dyscyplinie¹ **nauki
fizyczne**

Określenie osiągnięcia naukowego będącego podstawą ubiegania się o nadanie stopnia
doktora habilitowanego

Cykl jedynastu powiązanych tematycznie publikacji naukowych zatytułowany:
***Badanie fluktuacji krotności i netto-ładunku cząstek produkowanych w zderzeniach
jądrowych przy energiach relatywistycznych***

Wniosuję – na podstawie art. 221 ust. 10 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie
wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 zm.) – aby komisja habilitacyjna podejmowała
uchwałę w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego w głosowaniu **tajnym/jawnym***²

Zostałem poinformowany, że:

*Administratorem w odniesieniu do danych osobowych pozyskanych w ramach postępowania w
sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego jest Przewodniczący Rady Doskonałości
Naukowej z siedzibą w Warszawie (pl. Defilad 1, XXIV piętro, 00-901 Warszawa).*

*Kontakt za pośrednictwem e-mail: kancelaria@rdn.gov.pl , tel. 22 656 60 98 lub w siedzibie organu.
Dane osobowe będą przetwarzane w oparciu o przesłankę wskazaną w art. 6 ust. 1 lit. c)
Rozporządzenia UE 2016/679 z dnia 27 kwietnia 2016 r. w związku z art. 220 - 221 oraz
art.*

*232 – 240 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, w celu
przeprowadzenia postępowania o nadanie stopnia doktora habilitowanego oraz realizacji praw i
obowiązków oraz środków odwoławczych przewidzianych w tym postępowaniu.*

*Szczegółowa informacja na temat przetwarzania danych osobowych w postępowaniu dostępna jest
na stronie www.rdn.gov.pl/klauzula-informacyjna-rodo.html*

¹ Klasyfikacja dziedzin i dyscyplin wg. rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 20 września 2018 r. w sprawie dziedzin nauki i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin w zakresie sztuki (Dz. U. z 2018 r. poz. 1818).

² * Niepotrzebne skreślić.

.....
(podpis wnioskodawcy)

Załączniki:

1. Załącznik 1 Dane wnioskodawcy
2. Załącznik 2 Autoreferat
3. Załącznik 3 Wykaz osiągnięć naukowych
4. Kopia dyplomu doktora nauk fizycznych
5. Oświadczenie współautorów w tym rzeczownika współpracy eksperymentu NA61/SHINE (NA61/SHINE Collaboration)
6. Publikacje stanowiące osiągnięcie naukowe

Autoreferat

Spis treści

1. Dane personalne	2
2. Dyplomy i stopnie naukowe	2
3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	2
4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy	2
5. Inna istotna aktywność naukowa	26
6. Osiągnięcia dydaktyczne, organizacyjne i popularyzacja nauki	31
7. Inne istotne informacje	33

1. Dane personalne

Imiona **Maja Katarzyna**
Nazwisko **Maćkowiak-Pawłowska**

Numer identyfikacyjny naukowca

 <https://orcid.org/0000-0003-3954-6329>
 <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55155622300>
 <http://www.webofscience.com/wos/author/record/V-5129-2018>

2. Dyplomy i stopnie naukowe

- 2014 **Doktors der Naturwissenschaften, Fachbereich Physik**
Johann Wolfgang Goethe Universitat
Tytuł rozprawy: "Fluctuations of identified hadrons in p+p interactions at SPS energies"
Promotor: prof. dr hab. Marek Gazdzicki
Data nadania: 27.01.2014
Link: <https://edms.cern.ch/document/1349195/1>
Studia ukończone z wynikiem bardzo dobrym ("magna cum laude").
- 2009 **Magister inżynier**
Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki
Tytuł pracy: "Przewidywania teoretyczne i możliwości eksperymentalne pomiarów korelacyjnych w eksperymencie ALICE przy LHC w CERN"
Specjalizacja: Fizyka i technika jądrowa
Promotor: prof. dr hab. Jan Pluta
Data nadania: 22.07.2009
Studia ukończone z wyróżnieniem ("summa cum laude").

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- 01.05.2014 – .. **Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki**
Adiunkt w Zakładzie Fizyki Jądrowej w grupie pracowników badawczo-dydaktycznych
- 1.03.2011 – 28.02.2014 **Institut für Kernphysik, Johann Wolfgang Goethe Universität**
Asystent

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy

Cykl połączonych tematycznie publikacji, zgodnie z art. 219 ust. pkt. 2b ustawy

Tytuł: *Badanie fluktuacji krotności i netto-ładunku cząstek produkowanych w zderzeniach jądrowych przy energiach relatywistycznych*

W eksperymencie NA61/SHINE analiza danych oraz ich publikacja podzielone są na następujące etapy. Wstępna analiza danych jest regularnie dyskutowana na spotkaniach roboczych eksperymentu. Następnie, jeśli wyniki można przedstawić jako wstępne na konferencjach dziedzinowych, uzyskują one status opublikowanych jako **preliminary**. Dalej następują końcowe prace nad analizą i tekstem publikacji. Wyniki, które mają wejść w zakres danej publikacji, uzyskują status **final**, w trakcie otwartej dyskusji na forum całego eksperymentu. W tym momencie powoływana jest grupa redakcyjna (**Editorial Board**) składająca się z czterech lub pięciu osób, która opracowuje końcową wersję publikacji wraz z głównym autorem analiz. Lista autorów w publikacjach związanych z pomiarami eksperymentalnymi w dziedzinie jest porządkowana alfabetycznie.

Lista publikacji

- H1** **M. Maćkowiak-Pawłowska** i P. Przybyła. „Generalisation of the identity method for determination of high-order moments of multiplicity distributions with a software implementation”. W: *Eur.Phys.J.C* 78, 5 (2018), s. 391.  DOI: 10.1016/j.revip.2016.11.002. arXiv: 1702.07233 [hep-ex].
IF=4.84, pkt MEiN=40, cytowania INSPIRE-HEP=4
Byłam pomysłodawcą przedstawionej pracy. Współtworzyłam tekst manuskryptu oraz przeprowadziłam testy zaproponowanej metody na danych symulowanych. Mój wkład w powstanie publikacji oceniam na około 60%.
- H2** M. Gazdzicki, M. I. Gorenstein, **Mackowiak-Pawłowska, M.** i A. Rustamov. „Particle-Set Identification method to study multiplicity fluctuations”. W: *Nucl. Phys. A* 1001 (2020), s. 121915.  DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2020.121915. arXiv: 1903.08103 [nucl-th].
IF=1.68, pkt MEiN=100, cytowania INSPIRE-HEP=4
Uczestniczyłam w pracach nad opracowaniem metody, przeprowadzeniu symulacji oraz przygotowaniu tekstu publikacji. Mój wkład w powstanie pracy oceniam na około 25%.
- H3** **NA61/SHINE Collaboration.** „Measurements of higher-order cumulants of multiplicity and net-electric charge distributions in inelastic proton-proton interactions by NA61/SHINE”. W: *Eur. Phys. J. C* 84 (2024). [Erratum: *Eur.Phys.J.C* 85, 341 (2025)], s. 921.  DOI: 10.1140/epjc/s10052-024-13076-y. arXiv: 2312.13706 [hep-ex].
IF=4.8, pkt MEiN=140, cytowania INSPIRE-HEP=5
Byłam głównym autorem (primary author, PA) przedstawionej pracy, odpowiadając za jej realizację od etapu wstępnych analiz aż do finalnej publikacji. Opracowałam selekcję danych oraz przeprowadziłam całość analiz, w tym analizę danych modelowych. Przygotowałam pierwotną wersję manuskryptu oraz wszystkie rysunki. Jako główny autor uczestniczyłam we wszystkich spotkaniach Editorial Board. Po publikacji zidentyfikowałam błąd w przedstawionych wartościach i przygotowałam erratę. Mój wkład w powstanie pracy oceniam na około 90%.
- H4** **NA61/SHINE Collaboration.** „Measurements of multiplicity fluctuations of identified hadrons in inelastic proton-proton interactions at the CERN Super Proton Synchrotron”. W: *Eur. Phys. J. C* 81.5 (2021), s. 384.  DOI: 10.1140/epjc/s10052-021-09107-7. arXiv: 2009.01943 [nucl-ex].
IF=4.99, pkt MEiN=140, cytowania INSPIRE-HEP=7
Byłam głównym autorem (primary author, PA) omawianej publikacji, odpowiadając za całość prac badawczych – od wstępnych analiz aż po finalną wersję artykułu. Wstępna analiza danych została wykonana w ramach mojej rozprawy doktorskiej. Ze względu na konieczność poprawy kalibracji średniej straty energii na jonizację w danych p+p, całość analiz została przeprowadzona ponownie. Opracowałam ponadto pierwszy system poprawek na wydajność detektora na poziomie momentów rozkładów krotności cząstek zidentyfikowanych. Przygotowałam pierwotną wersję manuskryptu oraz wszystkie rysunki. Jako główny autor uczestniczyłam we wszystkich spotkaniach Editorial Board dotyczących tej pracy. Mój wkład w powstanie publikacji szacuję na około 90%.
- H5** **M. Maćkowiak-Pawłowska**, M. Naskręt i M. Gazdzicki. „Remarks on volume fluctuations in fixed-target heavy-ion experiments”. W: *Nucl. Phys. A* 1014 (2021), s. 122258.  DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2021.122258. arXiv: 2102.11186 [hep-ex].
IF=1.558, pkt MEiN=100, cytowania INSPIRE-HEP=4
Byłam głównym autorem przeprowadzonej analizy oraz tekstu publikacji. Wykonałam również wszystkie rysunki prezentujące dane modelowe. Mój wkład w powstanie pracy oceniam na około 85%.
- H6** Marek Gazdzicki, M. I. Gorenstein i **M. Maćkowiak-Pawłowska.** „Normalization of strongly intensive quantities”. W: *Phys. Rev. C* 88.2 (2013), s. 024907.  DOI: 10.1103/PhysRevC.88.024907. arXiv: 1303.0871 [nucl-th].
IF=0.9, pkt MEiN=70, cytowania INSPIRE-HEP=3
Uczestniczyłam w pracach nad opracowaniem procedury normalizacji, jej testowaniem oraz przygotowaniem tekstu publikacji. Mój wkład w powstanie pracy oceniam na około 33%.
- H7** M. Gazdzicki, M. I. Gorenstein, A. Fronczak, P. Fronczak i **M. Mackowiak-Pawłowska.** „Steady state

of isolated systems versus microcanonical ensemble in cell model of particle creation and annihilation". W: *Int. J. Mod. Phys. E* 26.12 (2017), s. 1750085. [DOI: 10.1142/S0218301317500859](#). arXiv: 1704.01878 [nucl-th].

IF=0.9, pkt MEiN=70, cytowania INSPIRE-HEP=3

Uczestniczyłam w pracach nad opracowaniem metody, przeprowadzeniu symulacji oraz przygotowaniu tekstu publikacji. Mój wkład w powstanie pracy oceniam na około 20%.

H8

M. Maćkowiak-Pawłowska (for the NA61/SHINE Collaboration). „NA61/SHINE results on fluctuations and correlations in p + p and Be + Be interactions at CERN SPS energies". W: *Nucl. Phys. A* 956 (2016). Red. Y. Akiba, S. Esumi, K. Fukushima, H. Hamagaki, T. Hatsuda, T. Hirano i K. Shigaki, s. 344–347. [DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2016.03.036](#). arXiv: 1602.03682 [nucl-ex].

IF=1.9, pkt MEiN=25, cytowania INSPIRE-HEP=2

W artykule podsumowującym wyniki kolaboracji NA61/SHINE przeprowadziłam analizę i dyskusję wyników udostępnionych lub opublikowanych przez eksperymenty NA61/SHINE oraz NA49. Koncepcja artykułu, jego struktura oraz całość tekstu manuskryptu zostały opracowane przeze mnie. Ponadto uczestniczyłam w zbieraniu danych eksperymentu NA61/SHINE omawianych w tej pracy oraz przygotowałam dane modelowe UrQMD dla zderzeń p+p i Pb+Pb. Mój wkład w powstanie artykułu oceniam na 100%.

H9

M. Maćkowiak-Pawłowska (for the NA61/SHINE Collaboration). „NA61/SHINE results on fluctuations and correlations at CERN SPS energies". W: *Nucl. Phys. A* 1005 (2021). Red. Feng Liu, Enke Wang, Xin-Nian Wang, Nu Xu i Ben-Wei Zhang, s. 121753. [DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2020.121753](#). arXiv: 2002.04847 [nucl-ex].

IF=1.558, pkt MEiN=100, cytowania INSPIRE-HEP=21

W artykule podsumowującym wyniki kolaboracji NA61/SHINE przeprowadziłam analizę i dyskusję wyników udostępnionych lub opublikowanych przez eksperymenty NA61/SHINE w tym wyników moich analiz dotyczących fluktuacji w zderzeniach p+p i Be+Be. Koncepcja artykułu, jego struktura oraz całość tekstu manuskryptu zostały opracowane przeze mnie. Ponadto uczestniczyłam w zbieraniu danych eksperymentu NA61/SHINE omawianych w tej pracy oraz przygotowałam dane modelowe UrQMD dla zderzeń p+p i Pb+Pb. Mój wkład w powstanie artykułu oceniam na 100%.

H10

M. Maćkowiak-Pawłowska (for the NA61/SHINE Collaboration). „Study of the phase diagram of strongly interacting matter in the NA61/SHINE experiment". W: *PoS PANIC2021* (2022), s. 238. [DOI: 10.22323/1.380.0238](#). arXiv: 2112.01877 [nucl-ex].

IF=0.08, pkt MEiN=5, cytowania INSPIRE-HEP=4

W artykule podsumowującym wyniki kolaboracji NA61/SHINE przeprowadziłam analizę i dyskusję wyników udostępnionych lub opublikowanych przez eksperymenty NA61/SHINE w tym wyników moich analiz dotyczących fluktuacji w zderzeniach p+p i Be+Be. Koncepcja artykułu, jego struktura oraz całość tekstu manuskryptu zostały opracowane przeze mnie. Ponadto uczestniczyłam w zbieraniu danych eksperymentu NA61/SHINE omawianych w tej pracy oraz przygotowałam dane modelowe UrQMD dla zderzeń p+p i Pb+Pb. Mój wkład w powstanie artykułu oceniam na 100%.

H11

NA61/SHINE Collaboration. „Multiplicity and net-electric charge fluctuations in central Ar+Sc interactions at 13A, 19A, 30A, 40A, 75A, and 150A GeV/c beam momenta measured by NA61/SHINE at the CERN SPS". W: *Eur. Phys. J. C* 85.8 (2025), s. 918. [DOI: 10.1140/epjc/s10052-025-14621-z](#). arXiv: 2503.22484 [nucl-ex].

IF=4.8, pkt MEiN=140, cytowania INSPIRE-HEP=3

W artykule przeprowadziłam niezależną weryfikację uzyskanych wyników fluktuacji krotności. Odpowiadałam za przygotowanie rysunków prezentujących wyniki oraz uczestniczyłam w pracach nad opracowaniem i redakcją tekstu publikacji. Mój wkład w powstanie pracy oceniam na około 40%.

Omówienie osiągnięcia naukowego

Badanie fluktuacji krotności i netto-ładunku cząstek produkowanych w zderzeniach jądrowych przy energiach relatywistycznych

Maja Maćkowiak-Pawłowska

Spis treści

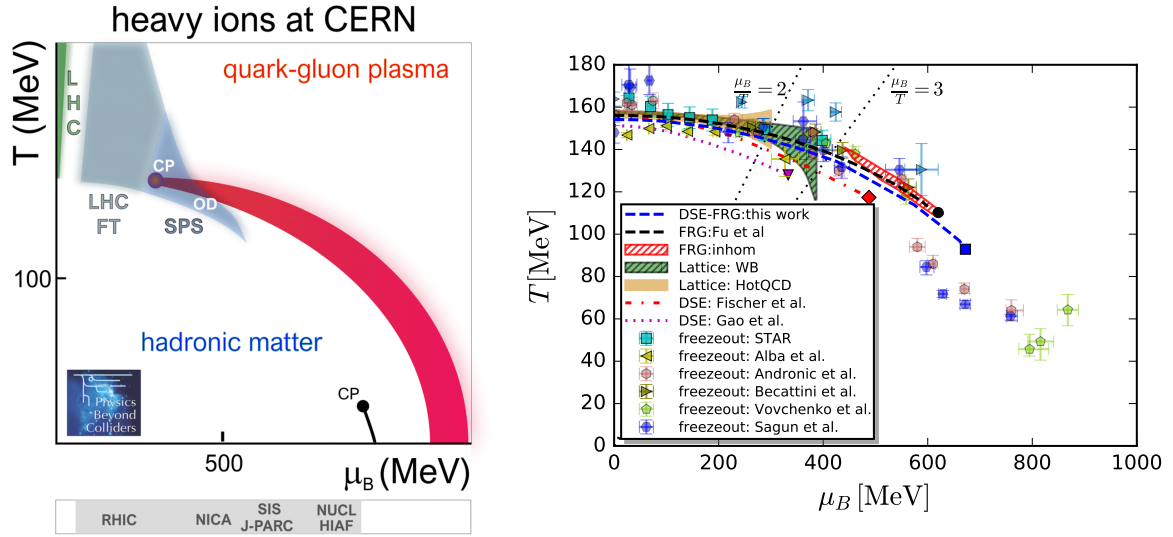
1	Wstęp	5
2	Eksperyment NA61/SHINE	8
3	Miary fluktuacji	9
4	Fluktuacje w eksperymentach fizyki wysokich energii	13
5	Pomiar krotności cząstek zidentyfikowanych w zderzeniach jądrowych	18
6	Podsumowanie	20

1 Wstęp

Oddziaływania silne — należące do czterech podstawowych oddziaływań w przyrodzie — są kluczowym elementem opisu świata cząstek elementarnych. To właśnie one odpowiadają za związanie kwarków i gluonów w hadrony. Są to cząstki takie jak protony i neutrony, które z kolei tworzą jądra atomowe. Siła oddziaływań silnych jest tak ogromna, że potrafi przewyciężyć wzajemne odpychanie elektryczne pomiędzy dodatnio naładowanymi protonami, utrzymując jądra atomowe w stanie stabilnym. Bez tego mechanizmu materia w znanej nam postaci by nie istniała.

Choć podstawowe zasady oddziaływań silnych opisuje teoria zwana chromodynamiką kwantową (QCD), ich praktyczne zrozumienie i modelowanie wciąż stanowi ogromne wyzwanie. Dzieje się tak dlatego, że gluony — cząstki pośredniczące w oddziaływaniach silnych — same mają ładunek silny, tzw. kolor. Oznacza to, że mogą oddziaływać nie tylko z kwarkami, lecz także między sobą, co prowadzi do niezwykle złożonej, nieliniowej dynamiki oddziaływań. W efekcie trudno jest opisać nawet pozornie proste układy, takie jak zderzenia proton-proton ($p+p$). Zrozumienie tych procesów pozostaje jednym z największych wyzwań współczesnej fizyki zderzeń jonów przy energiach relatywistycznych i motywuje badania prowadzone w największych laboratoriach świata, m.in. w Europejskim Ośrodku Badań Jądrowych (CERN).

Próba rozdzielania dwóch cząstek silnie oddziałujących — kwarków — nie prowadzi do spadku energii oddziaływania, lecz do jej wzrostu, aż do momentu, gdy energia staje się wystarczająca do wytworzenia nowej pary cząstka-antycząstka, kompensującej rozdzielane ładunki. Z tego



Rysunek 1: Schemat diagramu fazowego silnie oddziałującej materii w zależności od potencjału barionowego μ_B i temperatury T wraz z obszarami badanymi przez programy eksperymentalne w CERN [2] (*lewy panel*); oraz diagram fazowy silnie oddziałującej materii zakładający 2+1 zapachy kwarków wraz z współrzędnymi wymrożeń oszacowane z danych eksperymentalnych i możliwe lokalizacje CP przewidywane przez modele oddziaływań silnych (*prawy panel*). Są one zaznaczone punktami na końcach linii. Szczegóły obliczeń oraz źródło rysunku znajduje się w Ref. [3].

powodu w stanie naturalnym nie występują układy kwarków o niezbilansowanym ładunku kolorowym. Zjawisko to, zwane uwięzieniem, stanowi jeden z kluczowych aspektów QCD.

Aby lepiej zrozumieć naturę tych oddziaływań, fizycy próbują stworzyć warunki, w których system jest opisany przez kwarkowe i gluonowe (a nie hadronowe) stopnie swobody. Osiąga się to, zderzając ze sobą hadrony bądź jądra pierwiastków, przy ekstremalnie wysokich energiach. W takich warunkach materia może przejść w zupełnie nowy stan — tzw. plazmę kwarkowo-gluonową, w której kwarki i gluony przestają być uwięzione wewnątrz poszczególnych hadronów i mogą swobodnie się poruszać w obrębie całego układu.

W celu opisanego powstałego układu, wykorzystuje się pojęcia termodynamiczne, takie jak temperatura (T) czy potencjał barionowy (μ_B). Pozwala to traktować powstałą materię silnie oddziałującą jak układ termodynamiczny i umiejscowić go na tzw. diagramie fazowym QCD, który przedstawia różne stany materii silnie oddziałującej w zależności od powyższych parametrów [1]. Diagram ten stanowi narzędzie w badaniach nad strukturą i ewolucją materii w ekstremalnych warunkach, od wnętrza gwiazd neutronowych po pierwsze mikrosekundy istnienia Wszechświata. Należy zaznaczyć, że szczegóły jego reprezentacji (dobór wielkości oraz liczba osi) zależą od charakteru omawianego zjawiska. Przykładowy schemat takiego diagramu pokazano na lewym panelu rys. 1.

Część struktur diagramu fazowego nie została jeszcze jednoznacznie potwierdzona. Znana z wnętrza jądra atomowego materia jądrowa, odpowiadająca chemicznemu potencjałowi barionowemu rzędu masy nukleonu ($\mu_B \approx 938$ MeV) [4], jest jednym z najlepiej poznanych jego obszarów.

W jej bezpośrednim sąsiedztwie, dla nieco mniejszych wartości μ_B i rosnącej temperatury, znajduje się punkt krytyczny materii jądrowej przy $T \sim 19$ MeV i $\mu_B \sim 900$ MeV [5, 6, 7]

(zaznaczonego na lewym panelu rys. 1).

Dla $\mu_B \approx 0$ obliczenia chromodynamiki kwantowej na sieciach (lattice QCD) wskazują na gładkie przejście typu cross-over pomiędzy materią hadronową (hadronic matter na rys. 1) a materią kwarkowo-gluonową (quark-gluon plasma na rys. 1) przy temperaturze $T \approx 157$ MeV [8, 9].

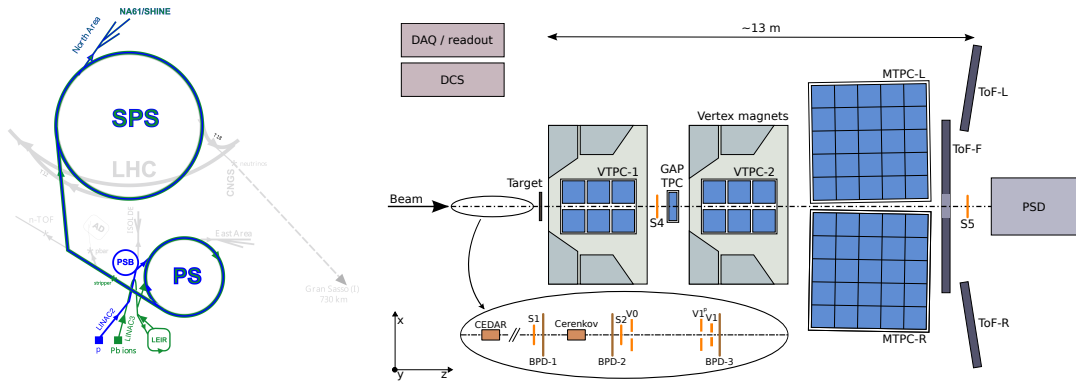
Z kolei dla niskich temperatur, ale wysokich wartości μ_B , modele jądrowe przewidują przejście fazowe pierwszego rodzaju [10, 11] – analogicznie do przejścia ciec–para wody w warunkach normalnych. W tym kontekście model SMES (Statistical Model of the Early Stage) [12] przewidział charakterystyczne struktury (tzw. kink, horn i step) na granicy przejścia z materii hadronowej do kwarkowej, które następnie zostały zaobserwowane i potwierdzone eksperymentalnie przez różne eksperymenty [2].

Pomiędzy gładkim przejściem typu cross-over przy niskich wartościach potencjału chemicznego a przejściem fazowym pierwszego rodzaju przy dużych μ_B oczekuje się istnienia tzw. punktu krytycznego (CP) – miejsca, w którym przejście zmienia charakter z *cross-over* na przejście fazowe pierwszego rodzaju. Niestety, obliczenia lattice QCD dla dużych wartości μ_B nie mogą być bezpośrednio zastosowane ze względu na tzw. problem znaku, który utrudnia symulacje numeryczne [13]. Choć sam model SMES sugeruje przejście fazowe pierwszego rodzaju, zmiany przewidywanych przez niego struktur w zależności od rzędu przejścia są zbyt subtelne w porównaniu z danymi eksperymentalnymi, aby pozwoliły jednoznacznie określić jego charakter. Istnienie punktu krytycznego pozostaje jednym z kluczowych, wciąż otwartych zagadnień fizyki zderzeń ciężkich jonów. Fluktuacje krotności, pędu poprzecznego czy typu cząstek są jednym z popularnych narzędzi wykorzystywanych do poszukiwania CP [14, 15].

Dotychczasowe próby oszacowania lokalizacji CP na podstawie różnych modeli silnie oddziałujących układów nie doprowadziły do spójnych wniosków. Teoretycznie przewidywane możliwe położenia punktu krytycznego przedstawiono na prawym panelu rys. 1, wraz z tzw. współrzednymi wymrożeń mierzonych układów — odpowiadającymi stanom, w których ustają oddziaływania między cząstkami (cząstki wciąż mogą się rozpadać).

Różnorodność możliwych lokalizacji CP przewidywanych w modelach spowodowała, że ciężar poszukiwania punktu krytycznego przejęły eksperymenty fizyki wysokich energii. Wiele międzynarodowych programów eksperymentalnych zawiera poszukiwanie punktu krytycznego jako jeden ze swoich głównych celów. Wśród nich można wymienić skan diagramu fazowego za pomocą systemów różnej wielkości przy energiach z zakresu akceleratora SPS w CERN [16, 17], skan z energią (Beam Energy Scan) [18, 19], który miał miejsce przy akceleratorze RHIC w BNL czy planowane badania w ośrodku FAIR w GSI [20].

Niniejsza lista publikacji poświęcona badaniom fluktuacji cząstek produkowanych w zderzeniach przy energiach relatywistycznych stanowi jeden z elementów tych poszukiwań. Prace [H1, H2] adresują problem niepełnej identyfikacji cząstek w fizyce wysokich energii, co zaburza proces pomiaru fluktuacji cząstek danego rodzaju, np. protonów. Poszukiwania punktu krytycznego dotyczą przede wszystkim analiz zderzeń ciężkich jonów a zderzenia hadron-hadron służą jako reakcja referencyjna [H3],[H4]. Wynika to z faktu, że system powstały w zderzeniu musi być wystarczająco duży aby sygnatury charakterystyczne dla CP mogły się pojawić - czułość na długość korelacji w układzie. Z tego powodu w zderzeniach jon+jon, istotna staje się centralność zderzenia, która wpływa również bezpośrednio na kształt mierzonych rozkładów. Zagadnieniu temu poświęcona jest praca [H5]. Istotny jest również wybór zmiennych wykorzystywanych w analizie oraz ich normalizacja jak pokazano w [H6]. Pomiar fluktuacji w zderzeniach jonjon wymaga uwzględnienia wpływu zasad zachowania oraz opis systemu w kontekście modeli statystycznych z uwzględnieniem wielu aspektów [21, 22]. Również praca [H7] jest poświęcona zagadnieniu jak zmienia się charakter rozkładu uwzględniając zjawiska naturalnie występujące



Rysunek 2: Lewy: Schemat toru wiązek hadronowych (niebieski) i jonowych (zielony) przesyłanych do eksperymentu NA61/SHINE w CERN. Prawy: Schemat układu detekcyjnego wykorzystywanego w trakcie zbierania danych w ramach skanu z rozmiarem systemu i energią zderzenia [H11].

w powstałym systemie. W przypadku tej pracy jest to porównanie modelu anihilacji i kreacji cząstek do przewidywań modelu mikrokanonicznego. Pomiar wartości eksperymentalnych w podobnych warunkach pomiaru (eksp. NA61/SHINE) fluktuacji krotności i netto-ładunku pozwala porównywać sygnał w systemach różnej wielkości - takim pomiarom oraz porównaniu poświęcone są prace porównujące zderzenia Pb+Pb [H8], Be+Be [H9] (pęd wiązki $150A \text{ GeV}/c$) i [H10] (pędy wiązki $20A\text{-}75A \text{ GeV}/c$), oraz Ar+Sc [H11] z $p+p$ [H3].

2 Eksperyment NA61/SHINE

Eksperyment NA61/SHINE (SPS Heavy Ion and Neutrino Experiment) to eksperyment na stacjonarnej tarczy mierzący naładowane hadrony w przednim obszarze hemisfery. Wykorzystuje on wiązki hadronowe i jonowe pochodzące z akceleratora SPS i jest zlokalizowany w obszarze North Area w CERN. Na rysunku 2 przedstawiono jego położenie w kompleksie akceleratorów oraz schemat układu detekcyjnego. Poprzednikiem NA61/SHINE był eksperyment NA49, który jako zarejestrował sygnał przejścia fazowego z materii hadronowej do kwarkowej [23] oraz wskazał potencjalną lokalizację CP [24].

Sercem układu detekcyjnego są cztery komory projekcji czasowej (TPC). Dwie z nich — VTPC-1 i VTPC-2 — umieszczone są w polu magnetycznym, natomiast kolejne dwie (MTPC-L i MTPC-R) znajdują się dalej wzdłuż kierunku biegu wiązki. Zestaw ten uzupełnia dodatkowa komora GAP TPC. Tak skonfigurowany układ detektorów, pracujący na stacjonarnej tarczy, zapewnia eksperymentowi NA61/SHINE dużą akceptancję dla cząstek naładowanych — przy maksymalnym polu magnetycznym i pędzie wiązki $158 \text{ GeV}/c$ na nukleon sięga ona około 45% [H3].

Układ detekcyjny uzupełniają dwa detektory Time-of-Flight (ToF) oraz kalorymetr hadronowy Projectile Spectator Detector (PSD). Zadaniem kalorymetru jest selekcja najbardziej centralnych zderzeń jon-jon z dużą dokładnością. Składa się on z 44 modułów o różnej szerokości, zależnej od odległości modułu od osi wiązki. Detektor PSD jest istotny dla analizy fluktuacji ponieważ pozwala badać i uwzględnić efekt selekcji centralności w zderzeniach jon+jon [H11][25].

Opisany układ detekcyjny w połączeniu z szeroką gamą dostępnych wiązek stwarza unikatowe warunki do badania produkcji naładowanych hadronów w wielu systemach. Duża akceptancja

pozwała na ekstrapolację widm cząstek do pełnej przestrzeni fazowej, a także na analizę fluktuacji i korelacji znacząco odbiegających od limitu Poissona. Dzięki tej wszechstronności program NA61/SHINE odpowiada na potrzeby trzech środowisk badawczych: fizyki zderzeń jonów przy energiach relatywistycznych, fizyki neutrin oraz badań promieniowania kosmicznego [26].

Zderzenia rejestrowane przez detektor podlegają jednak różnym zaburzeniom wynikającym z ograniczeń układu pomiarowego. W nowoczesnych eksperymentach efekty te koryguje się zazwyczaj przy pomocy poprawek opartych na symulacjach Monte Carlo odwzorowujących konkretne właściwości detektora. Symulacja układu detekcyjnego oraz wyznaczanie współczynników korekcyjnych stanowią więc kluczowy element analiz prowadzonych w ramach NA61/SHINE, jak również procesu projektowania i kalibracji samego detektora [H3, H4, H11]. Przygotowaniem danych symulowanych dla eksperymentu zajmuje się dedykowana grupa w strukturach NA61/SHINE.

3 Miary fluktuacji

W fizyce zderzeń ciężkich jonów rozróżnia się dwa rodzaje fluktuacji: statystyczne i dynamiczne. Fluktuacje statystyczne wynikają z faktu, że każdy badany rozkład opiera się na skończonej liczbie obserwacji – są więc naturalną konsekwencją ograniczonej próby.

Z kolei fluktuacje dynamiczne powstają w wyniku rzeczywistych procesów fizycznych zachodzących w układzie. Przykładem może być zasada zachowania ładunku barionowego, która prowadzi do fluktuacji liczby produkowanych protonów względem rozkładu Poissona. Spośród wszystkich możliwych stanów końcowych układu zrealizowane zostaną bowiem jedynie te, w których ładunek barionowy pozostaje zachowany. Innym przykładem jest wpływ procesu anihilacji i kreacji cząstek na kształt rozkładu krotności [H7].

Zainteresowanie badaczy fluktuacjami dynamicznymi wynika w dużej mierze z ich potencjalnej wrażliwości na obecność CP silnie oddziałującej materii. Czułość ta ma swoje źródło w zależności między momentami (lub kumulantami) rozkładów liczby wyprodukowanych cząstek – bądź netto-ładunków (różnicy między liczbą cząstek dodatnich i ujemnych) – a długością korelacji w powstałym układzie [27]. W pobliżu CP długość korelacji gwałtownie rośnie, co prowadzi do zasadniczej zmiany charakteru układu: staje się on samopodobny, a drobne zaburzenie w jednym obszarze natychmiast wpływa na całość.

Niestety, standardowe metody pomiarowe stosowane w badaniach zderzeń jądrowych skupione na pomiarze średnich i przekrojów czynnych na produkcję cząstek – w tym techniki wykorzystywane do poszukiwań plazmy kwarkowo-gluonowej – nie są wrażliwe na sam typ przejścia fazowego. Istnieją jednak wyjątki. Część z nich to obserwable oparte na fluktuacjach i korelacjach, które pozwalają na pośrednią detekcję zmian związanych z pojawieniem się CP. Jednym z przewidywań jest nietermiczne wzmocnienie przy niskich pędach poprzecznych (p_T) dla rozkładu pionów, które osiąga maksimum dla warunków zamrażania (freeze-out) bliskich CP [28].

Termin fluktuacje wymaga zdefiniowania odpowiedniego punktu odniesienia (referencji). W kontekście produkcji protonów naturalnym punktem odniesienia jest scenariusz, w którym wszystkie stany końcowe są dozwolone, bez ograniczeń wynikających z zasad zachowania. Standardowym punktem odniesienia w tego typu analizach jest opis gazu doskonałego w wielkim zespole kanonicznym (Ideal Boltzmann Grand Canonical Ensemble, IB-GCE), w którym wszystkie mikrostan są równoprawdopodobne. Jeżeli jednak rozważany układ podlega zasadom zachowania – takim jak zachowanie ładunku elektrycznego, liczby barionowej czy dziwności – wówczas opisuje się go w ramach zespołu kanonicznego (Canonical Ensemble).

Rozróżnienie czynników wpływających na produkcję cząstek z punktu widzenia fluktuacji

uzyskuje się poprzez analizę, w jakim stopniu momenty rozkładu (lub jego pochodne, np. momenty centralne bądź kumulanty) odbiegają od wartości referencyjnych.

Dla rozkładów krotności, czyli liczby cząstek (np. dodatnio lub ujemnie naładowanych) wyprodukowanych w zderzeniu, referencją jest rozkład Poissona. Ponieważ suma niezależnych rozkładów Poissona również ma charakter Poissona, ta własność zachowuje się dla wszystkich cząstek naładowanych rozpatrywanych łącznie. Odmienna sytuacja występuje w przypadku nettoładunku, gdzie rozkład w wielkim zespole kanonicznym przyjmuje postać rozkładu Skellama — odpowiadającego różnicy dwóch niezależnych rozkładów Poissona.

Odstępstwa od rozkładów Poissona lub Skellama stanowią zatem sygnaturę korelacji między cząstkami bądź ograniczeń wynikających z obowiązujących zasad zachowania.

Tak zdefiniowany punkt odniesienia pozwala określić, czy fluktuacje obserwowane w układzie są *stłumione* — gdy otrzymany rozkład jest węższy niż rozkład Poissona, ponieważ nie wszystkie stany są dozwolone — czy też *wzmocnione*, gdy pojawienie się jednego stanu sprzyja wystąpieniu innego.

Przykładem pierwszego zjawiska jest wpływ zasady zachowania ładunku elektrycznego, q , na rozkład nettoładunku elektrycznego. Całkowity ładunek elektryczny układu musi pozostać zachowany, zatem w zderzeniu $p+p$, gdzie początkowa różnica ładunku jest $+2$, różnica ładunków w końcowym stanie również wynosi $+2$. W takiej sytuacji rozkład nettoładunku w pełnej przestrzeni fazowej przyjmuje postać rozkładu delty Diraca:

$$P(X = x) = \begin{cases} k, & \text{jeśli } x = \Delta q, \\ 0, & \text{jeśli } x \neq \Delta q. \end{cases} \quad (1)$$

Tłumienie fluktuacji stanowi zatem efekt globalnych ograniczeń zasad zachowania, które zmniejszają liczbę możliwych realizacji stanu końcowego. To jak silny jest efekt wpływu zależy również od akceptacji kinetycznej analiz oraz typu rozważanych cząstek/ładunków, np. jeśli zamiast nettoładunku rozważana jest różnica $\pi^+ - \pi^-$.

Przykładem zjawiska *wzmocnienia fluktuacji* jest natomiast produkcja par cząstek, np. w wyniku rozpadu rezonansów lub korelacji kwantowych między cząstkami — jak omówiono w Ref. [29]. W tym przypadku pojawienie się jednej cząstki zwiększa prawdopodobieństwo pojawienia się innej, co skutkuje poszerzeniem rozkładu ponad poziom dany przez rozkład Poissona.

Odwołanie do rozkładów Poissona czy Skellama poprzez ich momenty umożliwia porównanie z modelami statystycznymi, pod warunkiem znajomości parametrów układu, takich jak jego objętość V . Porównanie samych momentów rozkładów wielkości opisujących stan końcowy (np. krotności) może być jednak zdominowane przez różnice w skali układów. Skrajnym przykładem takiego porównania jest porównanie liczby cząstek naładowanych produkowanych w zderzeniach $p+p$ do Pb+Pb przy energii $\sqrt{s_{NN}} = 17.3$ GeV. W pierwszym średnio obserwuje się kilka cząstek naładowanych w zderzeniu [30]. W drugim średnia liczba cząstek naładowanych sięga około pięćset [31].

Aby móc porównywać układy o różnej wielkości, należy stosować **wielkości intensywne**, tzn. niezależne od V , zamiast **ekstensywnych**, które są proporcjonalne do niej (jak np. krotność). Przykładami wielkości intensywnych są m.in. temperatura T czy stosunki cząstek, np. K^+/π^+ .

W analizach produkcji cząstek wielkości intensywne uzyskuje się zazwyczaj przez iloraz lub inne kombinacje dwóch bądź więcej wielkości ekstensywnych. Tak skonstruowane obserwable są intensywne w ramach IB-GCE i pokrewnych modeli [H6].

Jednym z popularnych przykładów jest *skalowana wariancja*, zdefiniowana jako:

$$\omega = \frac{\text{Var}[N]}{\langle N \rangle}, \quad (2)$$

gdzie N jest wielkością ekstensywną (np. krotnością cząstek), $\langle N \rangle$ oznacza jej wartość średnią, a $\text{Var}[N]$ — wariancję rozkładu N .

W układzie opisanym zgodnie z IB-GCE, skalowana wariancja krotności cząstek dodatnich lub ujemnych powinna wynosić $\omega = 1$. W przypadku całkowitego braku fluktuacji $\omega = 0$, np. wspomnianego rozkładu netto-ładunku w pełnej przestrzeni fazowej.

Model IB-GCE zakłada brak korelacji między cząstkami oraz możliwość swobodnej wymiany energii i cząstek z otoczeniem. Odchylenia od oczekiwanej wartości stanowią więc bezpośredni sygnał obecności dodatkowych efektów fizycznych — takich jak ograniczenia wynikające z zasad zachowania, korelacje dynamiczne, itp.

Porównując wartości obserwowanej skalowanej wariancji z oczekiwaniami modelu IB-GCE, można ilościowo ocenić wpływ tych efektów i wyznaczyć zakres, w jakim układ odbiega od idealnego zachowania statystycznego.

Podobną właściwość będą miały i wyższe kombinacje momentów, czy też kumulant rozkładu [15], takie jak:

- znormalizowana skośność: $\frac{\kappa_3}{\kappa_2}$, gdzie κ_k to kumulanta badanego rozkładu rzędu k .
- znormalizowana kurtoza: $\frac{\kappa_4}{\kappa_2}$;

Obie wielkości są wielkościami intensywnymi pozwalającymi porównać systemy o różnej objętości.

W przypadku badania rozkładów krotności skalowana wariancja, znormalizowana skośność i kurtoza to zmienne zachowujące również charakterystyczne wartości 0 w przypadku braku fluktuacji oraz 1 dla rozkładu Poissona. Dla rozkładu netto-ładunku (referencja - rozkład Skellama) wielkości te są modyfikowane odpowiednio do $\kappa_2/(\kappa_1^+ - \kappa_1^-)$, a κ_3/κ_2 do κ_3/κ_1 , natomiast znormalizowana kurtoza pozostaje bez zmian.

Stosunek kumulant jest istotną wielkością w poszukiwaniu CP również z powodu możliwości połączenia ich z podatnością kwarkową poprzez:

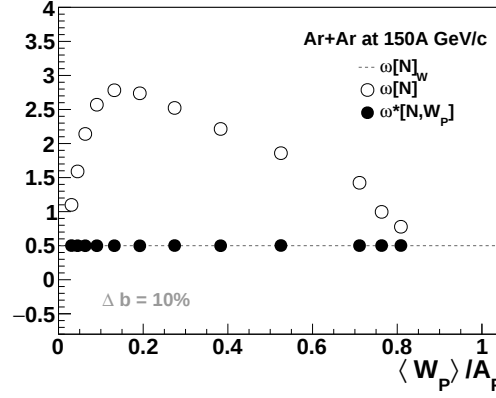
$$\chi_{mn}^{XY} = \frac{\partial^{(m+n)}[p(\hat{\mu}_X, \hat{\mu}_Y)/T^4]}{\partial \hat{\mu}_X^m \partial \hat{\mu}_Y^n} \Big|_{\vec{\mu}=0}, \quad (3)$$

gdzie $\vec{\mu} = (\mu_B, \mu_S, \mu_Q)$ odpowiada barionowemu, dziwnemu i elektrycznemu potencjałowi chemicznemu, a $X, Y = B, S, Q$, natomiast m i n to rząd podatności [32]. Te uogólnione podatności są związane z kumulantami zachowanych ładunków poprzez:

$$\begin{aligned} \kappa_1 &\equiv \langle N_X \rangle = VT^3 \chi_1^X, \\ \kappa_2 &\equiv \langle (\delta N_X)^2 \rangle = VT^3 \chi_2^X, \\ \kappa_3 &\equiv \langle (\delta N_X)^3 \rangle = VT^3 \chi_3^X, \\ \kappa_4 &\equiv \langle (\delta N_X)^4 \rangle - 3\langle (\delta N_X)^2 \rangle^2 = VT^3 \chi_4^X. \end{aligned}$$

a ich wielkości intensywne poprzez:

$$\begin{aligned} \frac{\kappa_2}{\kappa_1} &= \frac{\chi_2^X}{\chi_1^X}, \\ \frac{\kappa_3}{\kappa_2} &= \frac{\chi_3^X}{\chi_2^X}, \\ \frac{\kappa_4}{\kappa_2} &= \frac{\chi_4^X}{\chi_2^X}. \end{aligned}$$



Rysunek 3: Zależność skalowanej wariancji, jej silnie intensywnego odpowiednika ($\omega^*[N, W_P]$) od wyboru centralności zderzenia w oparciu o paramter zderzenia b ($\sim V$). Przerywaną linią zaznaczona jest wartość skalowanej wariancji dla stałej objętości ($\omega[N]_W$). Szczegóły patrz [H5].

To połączenie pozwala porównać wyniki obliczeń chromodynamiki kwantowej na sieciach z wynikami eksperymentalnymi.

W przypadku zderzeń jądrowych innym istotnym efektem, wpływającym na wybór zmiennych fluktuacyjnych są fluktuacje rozmiaru zderzanego układu od jednego zderzenia do drugiego. Dla wspomnianej już skalowanej wariancji pojawia się wtedy wkład od fluktuacji objętości:

$$\omega = \frac{Var[N]}{\langle N \rangle} = \omega[N] + \langle n \rangle \omega[V], \quad (4)$$

gdzie $\omega[n]$ jest skalowaną wariancją dla $V = const$, natomiast $\omega[V] = \frac{Var[V]}{\langle V \rangle}$ jest miarą fluktuacji objętości systemu w zderzeniach. Możliwy wpływ fluktuacji objętości na ω został przedstawiony na rys. 3.

W kontekście poszukiwania CP i ogólnie własności oddziaływań silnych tylko pierwszy człon dla stałej objętości jest istotny. Zależność dla pozostałych stosunków kumulant jest jeszcze bardziej złożona jak pokazano w [33].

Jest kilka możliwych sposobów wyeliminowania fluktuacji objętości. Jedną z nich jest wykorzystanie zmiennych silnie intensywnych, i.e. takich, które nie zależą od objętości układu ani jej fluktuacji [H6]. Najprostszą taką zmienną można uzyskać poprzez podzielenie pierwszych momentów/kumulant dwóch zmiennych ekstensywnych przez siebie, np. $\frac{\langle K^+ \rangle}{\langle \pi \rangle}$. Jak łatwo zauważyć konstrukcja tych zmiennych wymaga dwóch wielkości ekstensywnych charakteryzujących zderzenie. Dla momentów/kumulant drugiego rzędu są to znane wielkości $\Phi[P_T, N]$ czy uogólnione $\Sigma[P_T, N]$ i $\Delta[P_T, N]$. Ich ogólną formę dla kumulant wyższych rzędów podał E. Sangaline [34]. Ceną korzystania z tych zmiennych jest ich często nieintuicyjna interpretacja wynikająca z wykorzystania dwóch zmiennych ekstensywnych. W szczególnych przypadkach możliwe jest odtworzenie wielkości zmiennej intensywnej jak pokazano w [H5] (patrz rys. 3).

Innymi możliwymi rozwiązaniami są:

- selekcja najbardziej centralnych zderzeń, np. 1% lub 0.02% najbardziej centralnych zderzeń [H5, H9, H11];
- wprowadzenie kolejnych wielkości kinematycznych mierzonych w zderzeniu, które pozwolą wyizolować wkład fluktuacji objętości [H6][35];

- Centrality Bin Width Correction (CBWC) [36] - metoda redukcji fluktuacji objętości w szerokim przedziale centralności poprzez analizę podprzedziałów;
- uwzględnienie fluktuacji objętości w przewidywaniach teoretycznych [37].

4 Fluktuacje w eksperymentach fizyki wysokich energii

Fluktuacje i korelacje odnoszą się do związków między cząstkami powstającymi w pojedynczym zderzeniu, dostarczając informacji o dynamice procesu oraz o stanie układu w poszczególnych etapach jego ewolucji. Badanie fluktuacji obejmuje analizę wielkości opisujących całe zdarzenie, co pozwala uwzględnić wszystkie efekty kontrybuujące do danego rozkładu. Do głównych czynników wpływających na obserwowany sygnał należą:

1. różne klasy zderzeń, obejmujące przypadki z wytworzeniem plazmy kwarkowo-gluonowej, bez jej powstania, bądź z przejściem układu w pobliżu punktu krytycznego fazowego diagramu QCD;
2. fluktuacje stanu początkowego (objętości i konfiguracji geometrycznej), wynikające z losowych różnic w rozkładzie nukleonów w zderzających się jądrach;
3. korelacje dwu-cząstkowe powstające w wyniku rozpadu rezonansów, efektów kwantowych (np. Bosego–Einsteina) lub oddziaływań końcowych pomiędzy cząstkami;
4. korelacje wielocząstkowe będące konsekwencją globalnych praw zachowania, takich jak zachowanie energii, pędu czy ładunku;
5. ograniczenia wynikające z badanego obszaru kinematycznego, które mogą prowadzić do zniekształceń badanych rozkładów.

Złożony charakter procesów wpływających na obserwowane fluktuacje sprawia, że ich analiza jest znacznie bardziej wymagająca niż badania średniej krotności cząstek produkowanych w zderzeniach. W konsekwencji rozwój tej dziedziny przez długi czas postępował wolniej niż analiza widm cząstek, stanowiąca dominujący nurt badań w fizyce wysokich energii. Dopiero w ostatniej dekadzie, w związku z intensywnymi poszukiwaniami CP oraz dynamicznym rozwojem zaawansowanych metod statystycznych, obserwuje się znaczący postęp w zakresie badań fluktuacji. Nowoczesne techniki analizy danych pozwalają na bardziej precyzyjną interpretację wyników eksperymentalnych, a także na głębsze zrozumienie procesów zachodzących w materii silnie oddziałującej, w tym jej przejść fazowych i mechanizmów termalizacji.

Współczesne metody badania fluktuacji wywodzą się z analiz prowadzonych przy niższych energiach w eksperymentach z użyciem komór pęcherzykowych i strumieniowych. Wyniki tych pionierskich badań stanowią obecnie punkt odniesienia zarówno dla modeli fenomenologicznych, jak i dla danych uzyskiwanych w nowoczesnych eksperymentach przy akceleratorach wysokich energii. Przegląd wyników dotyczących fluktuacji obserwowanych w zderzeniach $p+p$ oraz omówienie perspektyw pomiarowych dla zderzeń jądrowych przedstawiono w Ref. [38]. Dodatkowe analizy dotyczące zderzeń $p+p$ zaprezentowano m.in. w Refs. [39, 40, 41, 42, 43, 44].

Wczesne badania nad rozkładami krotności w zderzeniach hadronowych koncentrowały się przede wszystkim na analizie wariancji lub skalowanej wariancji rozkładu krotności oraz na badaniu pełnych rozkładów krotności w całej dostępnej przestrzeni fazowej. Kierunek tych prac w dużej mierze determinowały ograniczenia techniczne i statystyczne ówczesnych eksperymentów. Zderzenia $p+p$ rejestrowano w komorach pęcherzykowych i komorach strumieniowych, co

umożliwiało obserwację torów cząstek wtórnych w pełnej przestrzeni fazowej. Mimo tej zalety, analiza danych była niezwykle czasochłonna, a liczba dostępnych zdarzeń – niewielka w porównaniu z późniejszymi pomiarami prowadzonymi przy użyciu detektorów elektronicznych o dużej przepustowości.

Dodatkowym ograniczeniem była niepełna identyfikacja cząstek naładowanych, bez jednoznacznego określenia ich rodzaju (np. pionów, kaonów czy protonów). W rezultacie wczesne analizy dotyczyły głównie całkowitej liczby cząstek naładowanych, stanowiących istotną, lecz niepełną reprezentację wszystkich produktów zderzenia.

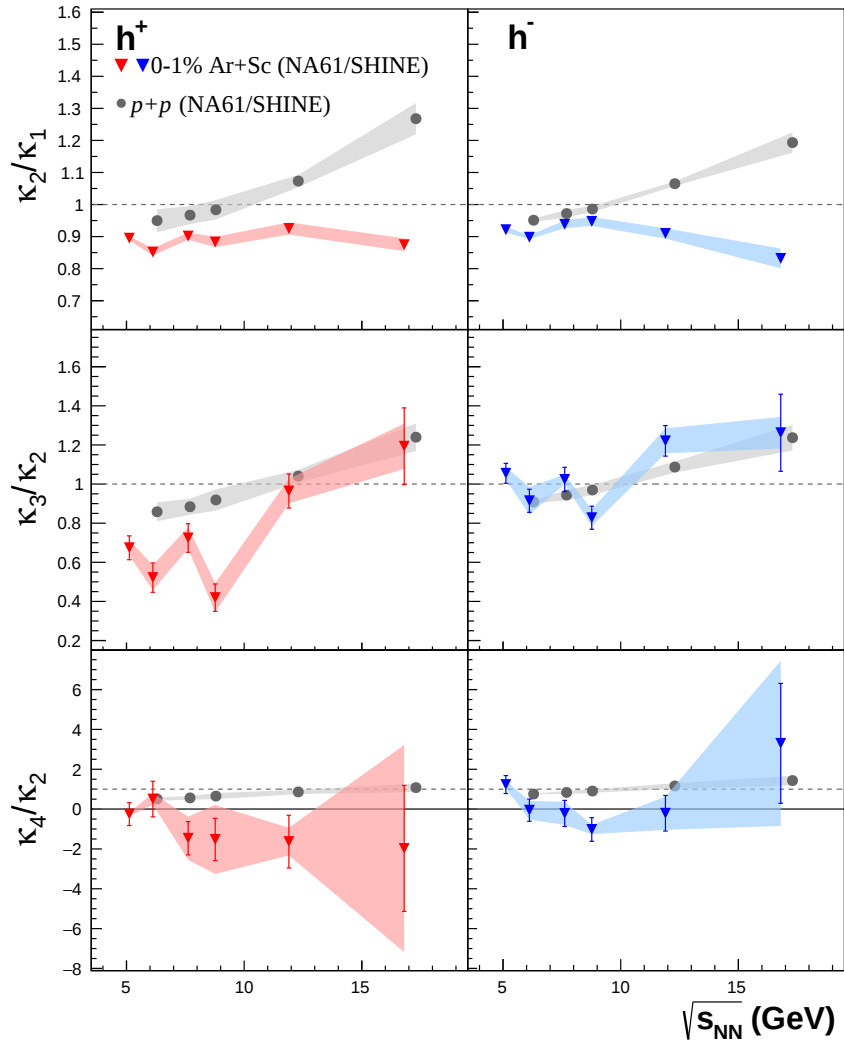
Pomimo tych ograniczeń uzyskano szereg istotnych rezultatów, które stały się fundamentem dalszych badań nad fluktuacjami krotności i mechanizmami produkcji cząstek w zderzeniach $p+p$. Do najważniejszych wniosków należą:

- rozkład krotności w pełnej przestrzeni fazowej ma charakter zbliżony do rozkładu lognormalnego;
- rozkłady krotności wykazują własność skalowania, znaną jako skalowanie Koba–Nielsena–Olesena (KNO), a w późniejszych pracach rozszerzoną do tzw. skalowania KNO-G;
- średnia liczba cząstek naładowanych $\langle N_{ch} \rangle$ wykazuje monotoniczny wzrost z energią zderzenia co prowadzi m.in. do liniowego wzrostu skalowanej wariancji.

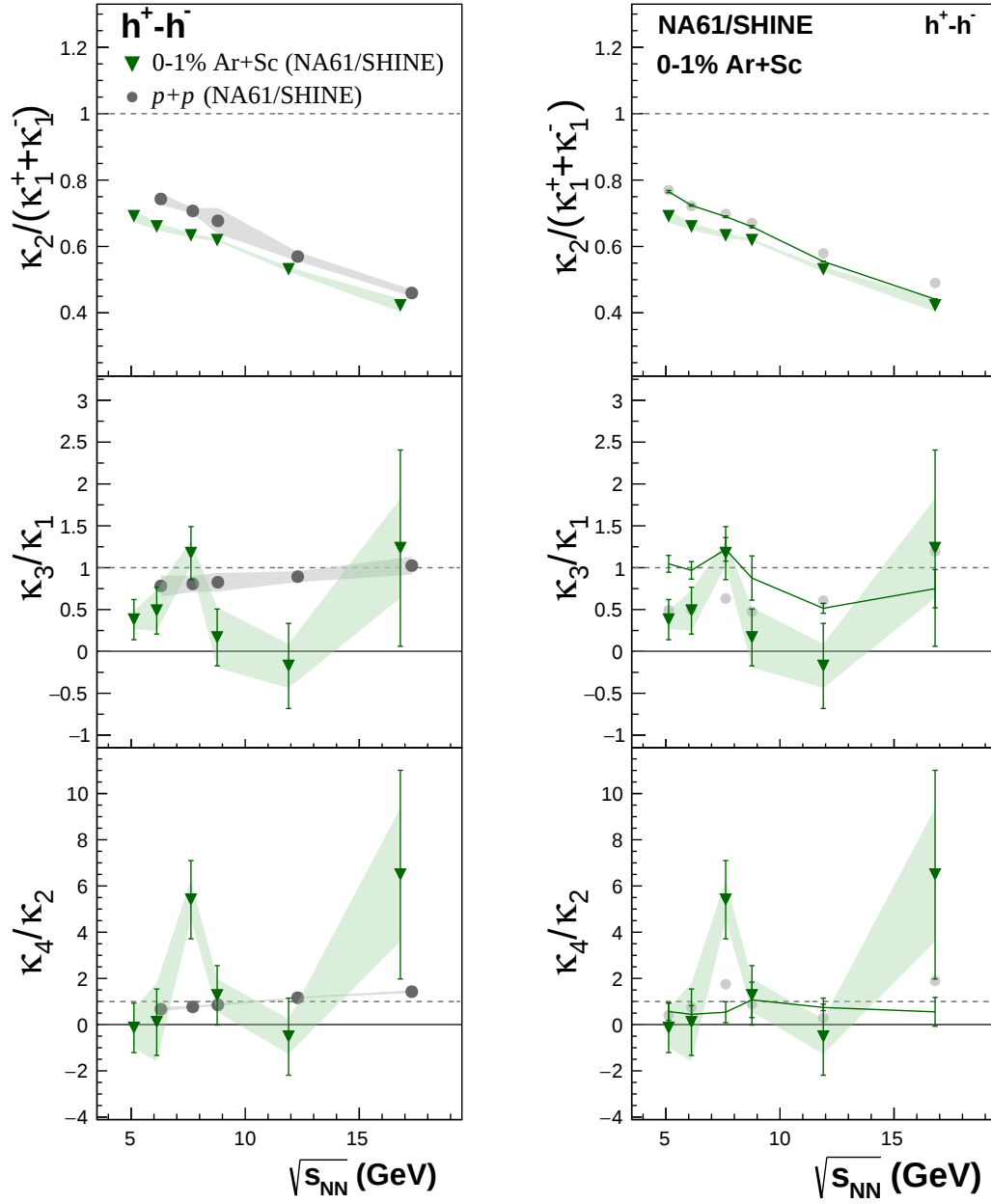
Widoczną konsekwencją wspomnianego skalowania jest liniowy wzrost skalowanej wariancji rozkładu cząstek naładowanych w pełnej przestrzeni fazowej w zderzeniach $p+p$. Podobny trend obserwowany jest również współcześnie dla $p+p$ — wzrost z energią zderzenia skalowanej wariancji cząstek naładowanych oraz pionów w ograniczonej akceptancji, jak pokazano w [H4, H3]. Te dane referencyjne umożliwiły bezpośrednie porównanie wyników z zderzeń elementarnych z wynikami dla zderzeń jądro+jądro [H9, H10, H11].

Porównanie tych wyników ujawnia wyraźną zmianę charakteru tworzącego się układu. W zderzeniach $p+p$ produkcja cząstek jest zdominowana przez procesy prowadzące do skalowania KNO-G, natomiast w zderzeniach jądrowych obserwuje się silny wpływ globalnych zasad zachowania, które ograniczają możliwe realizacje stanu końcowego. Zjawisko to można interpretować w kontekście statystycznego opisu produkcji cząstek w zderzeniach jon+jon. W zderzeniach jon+jon, większych niż jądro berylu [H9], zjawiska kolektywne zaczynają odgrywać istotną rolę. Ich wpływ został zaobserwowany w zderzeniach Pb+Pb przez eksperyment NA49 [45] [H8] oraz w zderzeniach Ar+Sc w eksperymencie NA61/SHINE [H10, H11]. Obserwowana jest taka zmiana zachowania również w badaniach modelowych [21]. Dane wskazują, że skalowana wariancja cząstek naładowanych w ograniczonej akceptancji nie rośnie już liniowo, a w wielu przypadkach jest nawet mniejsza od wartości oczekiwanej dla rozkładu Poissona, jak pokazano na rys. 4.

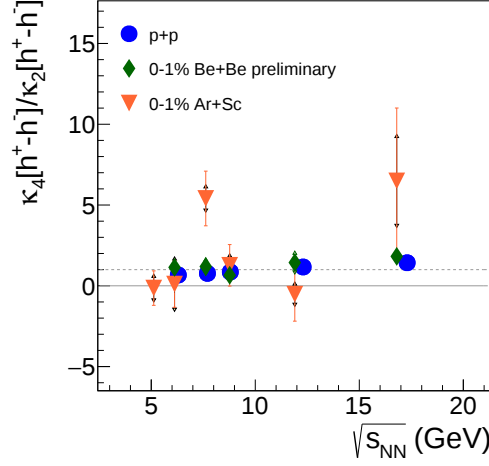
Systematyczna różnica w zachowaniu fluktuacji między zderzeniami $p+p$ a Pb+Pb nie jest obecnie interpretowana jako bezpośredni sygnał obecności CP, lecz tzw. *baseline effects* [46], [H3], czyli zmiany charakteru produkcji cząstek czy relacji objętości układu i zasad zachowania [21, 29]. Systematyczny pomiar fluktuacji w układach, gdzie CP nie jest spodziewane dostarcza informacji o czułości fluktuacji na różne znane efekty i poprawia możliwość wykorzystania ich interpretacji. We wczesnych analizach główną uwagę skupiano na poszukiwaniu lokalnego maksimum sygnału fluktuacji (tzw. *hill of fluctuations*), które mogłoby wskazywać, że parametry układu zbliżają się do wartości krytycznych. Poszukiwania te stanowiły jedną z głównych motywacji eksperymentu NA61/SHINE oraz programu Beam Energy Scan realizowanego w ośrodku RHIC przez eksperyment STAR [18, 19]. Obecnie nie tylko zmienił się zakres mierzonych wielkości - z cząstek naładowanych na zidentyfikowane i rozkłady netto-ładunków; ale również rząd momentów/kumulant, które są badane - z drugiego do czwartego i szóstego [47].



Rysunek 4: Zależność od energii stosunków κ_2/κ_1 (górną), κ_3/κ_2 (środek) oraz κ_4/κ_2 (dół) dla rozkładu krotności dodatnio (lewa kolumna) i ujemnie (prawa kolumna) naładowanych hadronów w najbardziej centralnych (1%) zderzeniach $^{40}\text{Ar}+^{45}\text{Sc}$ [H11] oraz $p+p$ [H3]. Słupki niepewności przedstawiają niepewności statystyczne, natomiast kolorowe pasma obrazują niepewności systematyczne. Linia przerywana na poziomie jedności odpowiada wartości referencyjnej dla rozkładu Poissona, natomiast linia ciągła na poziomie zera przedstawia przypadek braku fluktuacji w układzie.



Rysunek 5: Zależność od energii fluktuacji netto-ładunku w zderzeniach Ar+Sc (zielone trójkąty) [H11] w porównaniu z zderzeniami $p+p$ (szare kółka) [H3] (*lewy panel*) oraz przewidywaniami modelu EPOS1.99 (*prawy panel*). Jasno szare punkty na prawym panelu przedstawiają sygnał zmierzony bez poprawek na wpływ detektora.



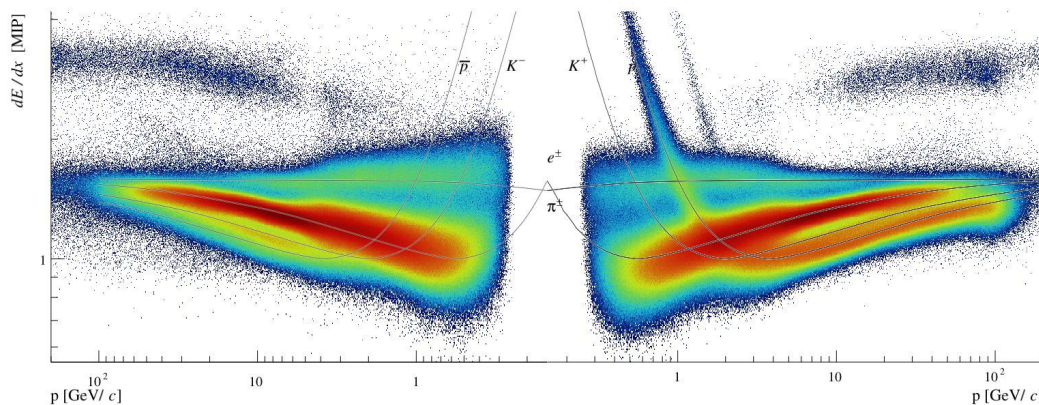
Rysunek 6: Zależność od energii $\kappa_4/\kappa_2[h^+ - h^-]$ w zderzeniach $p+p$ [H3], Be+Be [H9, H10], i Ar+Sc [H11].

Zainteresowanie fluktuacjami doprowadziło do dynamicznego rozwoju metod analitycznych oraz modeli teoretycznych, ze szczególnym uwzględnieniem narzędzi do ich pomiaru [21, 48, 49, 50, 15, 51, 52] oraz [H1, H2]. Zwiększająca się statystyka dostępnych danych umożliwiła analizę nie tylko szerokości rozkładów (wariancji), lecz także wyższych momentów (kumulantów), co pozwala nie tylko na poszukiwanie punktu krytycznego, ale również na weryfikację przewidywań obliczeń chromodynamiki kwantowej na sieciach.

Rosnąca świadomość czułości fluktuacji na wydajność detekcji oraz potencjalne zaburzenia pomiaru, szczególnie w analizach wyższych momentów, podkreśliła konieczność uwzględnienia efektów detektorowych. W przypadku analizy fluktuacji krotności stosuje się obecnie korekty na wydajność detekcji oraz wpływ cząstek pochodzących z rozpadów słabych. Korekty te mogą być wprowadzane na poziomie momentów (jak w przypadku [H4]) lub poprzez dekonwolucję rozkładu krotności obserwowanego w danych z odpowiedzią detektora (jak w przypadku [H3, H11]).

W ramach mojej działalności naukowej wprowadziłam najpierw poprawki na efekty detektorowe w rozkładach cząstek zidentyfikowanych w zderzeniach $p+p$ [H4], a następnie opracowałam metodę dekonwolucji rozkładów dla analiz fluktuacji w eksperymencie NA61/SHINE — początkowo dla danych $p+p$ [H3], a następnie, dla zderzeń Be+Be [H9, H10] oraz we współpracy z dr inż. Justyną Cybowską, dla zderzeń Ar+Sc [H11]. Wraz z moją dyplomantką mgr Agnieszką Borucką sprawdziliśmy czułość mierzonych wielkości na zmianę okna akceptacji oraz warunków początkowych w zderzeniach $p+p$ poprzez zbadanie wrażliwości stosunków kumulant na zmianę przedziału pociętości i jego szerokości [53].

Fluktuacje netto-ładunku pozwalają na nie tylko poszukiwanie punktu krytycznego, ale poprzez mniej skomplikowane połączenie z podatnościami kwarkowymi mogą pozwolić również na porównanie danych eksperymentalnych z obliczeniami chromodynamiki kwantowej. W ramach analiz reakcji $p+p$, Be+Be oraz Ar+Sc zostały zbadane fluktuacje netto-ładunku cząstek naładowanych. W celu porównania zanalizowano również fluktuacje netto-ładunku w zderzeniach $p+p$ (rys. 5 lewy panel) oraz przewidywania modelu EPOS1.99 (rys. 5 prawy panel), który dla wielu obserwacji jest zgodny z wynikami NA61/SHINE [30]. Aby takie porównanie było możliwe w przypadku zderzeń Be+Be i Ar+Sc wybrane zostały tylko najbardziej centralne zderzenia (1% najbardziej centralnych) Ar+Sc. W innym przypadku znaczący i trudny do osza-



Rysunek 7: Zależność średniej energii traconej przez cząstkę na jonizację ośrodka od jej pędu. Zaznaczone krzywe odpowiadają przewidywaniom równania Bethe–Blocha dla różnych typów cząstek [60].

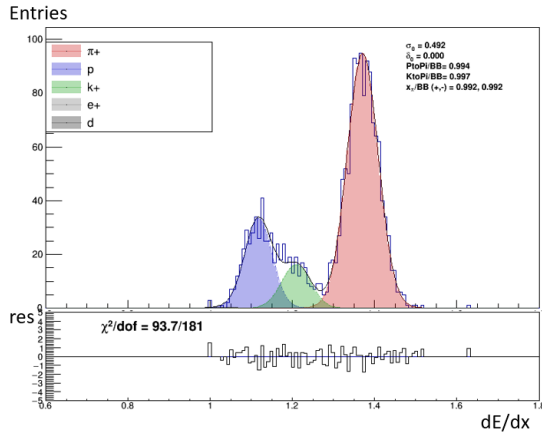
owania wkład wnosząby fluktuacje objętości jak zostało pokazane w [H5]. Przykład zależności $\kappa_4/\kappa_2[h^+ - h^-]$ dla wszystkich trzech systemów jest zamieszczony na rys. 6. Alternatywą byłoby wykorzystanie np. zmiennych silnie intensywnych jak wykorzystano w [54, 31]. Finalnie otrzymany sygnał nie wskazuje na obecność CP w mierzonym sygnale. Największe rozbieżności w stosunku do danych Ar+Sc oraz przewidywań modelu EPOS1.99 znajdują się dla niskich bądź średnich energii SPS. Niestety niepewności pomiaru są znaczące. Ponieważ inne analizy czułe na sygnał CP [55, 56, 57, 58] nie wykazują jego obecności w zderzeniach Ar+Sc na chwilę obecną obserwowane w fluktuacjach różnice nie są jednoznacznie przypisywane obecności CP. Dalsza analiza wymaga większej statystyki danych dla takiej wielkości systemu i jest planowana dla dużej statystyki zderzeń O+O i Mg+Mg [59].

5 Pomiar krotności cząstek zidentyfikowanych w zderzeniach jądrowych

Pomiar netto-ładunku barionowego lub dziwnego wymaga identyfikacji cząstek (PID), która stanowi jedno z najtrudniejszych zagadnień eksperymentalnych w fizyce wysokich energii. Obszar kinematyczny, w którym eksperymenty umożliwiają identyfikację cząstek, jest zazwyczaj węższy niż ten dostępny dla analiz obejmujących wszystkie zarejestrowane cząstki. Dodatkowo, sama identyfikacja często nie jest jednoznaczna. Przykładem obserwabli wykorzystywanej do identyfikacji cząstek jest średnia energia tracona przez cząstkę na jonizację ośrodka (dE/dx), przedstawiona na rys. 7.

Zaznaczone krzywe przedstawiają parametryzację Bethe–Blocha dla różnych typów cząstek. Jest to opis fenomenologiczny, a indywidualne ślady są rozrzucone wokół tych krzywych. Identyfikację można przeprowadzić na kilka sposobów.

Najprostszą metodą jest wybór obszaru wokół krzywej, w którym prawdopodobieństwo, że cząstka jest danego typu, przekracza np. 90%. Takie podejście jest często stosowane w analizach widm rezonansów [61] oraz badań intermitencji [58]. Niestety, w przypadku cząstek takich jak K^+ , których sygnał pokrywa się z sygnałami od π^+ i protonów, taka metoda staje się mało skuteczna. Dodatkowym problemem są straty cząstek spowodowane ograniczeniami detekcji i



Rysunek 8: Rozkład dE/dx dla cząstek naładowanych w zakresie pędów całkowitych 6.87–8.04 GeV/c oraz pędu poprzecznego 0.4–0.5 GeV/c w zderzeniach $p+p$ przy pędzie wiązki 158 GeV [60].

niejednoznacznością identyfikacji. Bardziej zaawansowaną techniką jest dopasowanie rozkładów dE/dx dla różnych typów cząstek, jak pokazano na rys. 5.

Metoda ta jest powszechnie wykorzystywana w analizach widm cząstek naładowanych [30] oraz fluktuacji cząstek zidentyfikowanych [H4]. Po dopasowaniu rozkładów poszczególnych typów cząstek w przedziałach pędu całkowitego i poprzecznego można każdej cząstce przypisać prawdopodobieństwo przynależności do danego typu, tzw. identity (w_i). Sumując te prawdopodobieństwa dla wszystkich cząstek w danym zderzeniu, otrzymuje się rozkłady krotności *rozmyte* o ograniczoną rozdzielczość identyfikacji. Przykład obu wielkości dla dodatnio naładowanych pionów ilustruje rys. 9.

Taki rozmyty rozkład pozwala na poprawne wyznaczenie średniej krotności cząstek, tj. $\langle N_i \rangle = \langle W_i \rangle$, o ile pomiar dE/dx nie wprowadza korelacji między cząstkami. Dla wyższych momentów rozkładu relacja ta nie jest już spełniona. Aby móc poprawnie wyznaczać wariancje i wyższe momenty krotności, opracowana została metoda identity, której jestem jednym z współautorów.

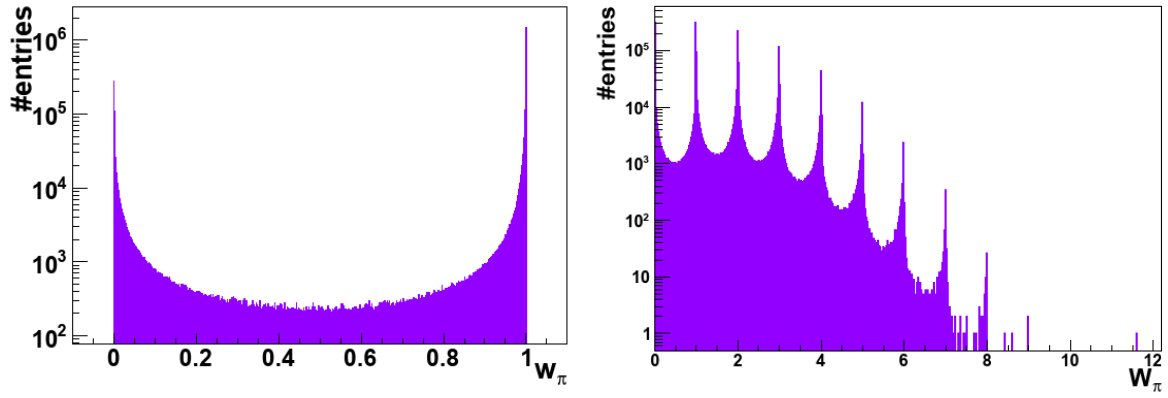
Metoda identity umożliwia dekonwolucję momentów rozkładu krotności z efektu rozmycia PID [H1], [62]. Pierwsza wersja metody została opracowana dla drugich momentów, jednak wkrótce została uogólniona na dowolny rząd [H1]. Metoda ta została z powodzeniem zastosowana w wielu eksperymentach i zestawach danych, m.in. w [H8, H4], [31, 63].

Podstawowe założenie metody identity zakłada, że pojedynczy pomiar dE/dx jest niezależny od pozostałych. W praktyce jednak, w danych rzeczywistych założenie to jest naruszane — rozkład cząstek danego typu wokół krzywej Bethe–Blocha jest oparty na danych eksperymentalnych, co prowadzi do korelacji między pomiarami. Jeśli jednak korelacje te są słabe, metoda identity nadal działa skutecznie.

Aby obejść ograniczenia wynikające z tych korelacji, zaproponowana została metoda Particle-Set [H2], będąca rozwinięciem koncepcji identity [64]. Pozwala ona uwzględnić rozdzielczość PID w obliczeniach momentów dowolnego rzędu, analizując odpowiednio złożone grupy cząstek — np. pary dla momentów drugiego rzędu, trójki dla trzeciego itd.

Metody identity oraz Particle-Set stanowią dziś istotne narzędzia w analizach fluktuacji cząstek zidentyfikowanych, pozwalając zminimalizować wpływ ograniczonej rozdzielczości PID na wyniki fizyczne i zapewniając porównywalność pomiarów między różnymi eksperymentami [H8, H4], [31, 63].

W przypadku analiz prowadzonych w eksperymencie NA61/SHINE opublikowane zostały wyniki fluktuacji cząstek zidentyfikowanych w zderzeniach $p+p$ [H4]. Dla naładowanych pionów obserwuje się wzrost skalowanej wariancji wraz z energią zderzenia, zgodny z trendem znanym z



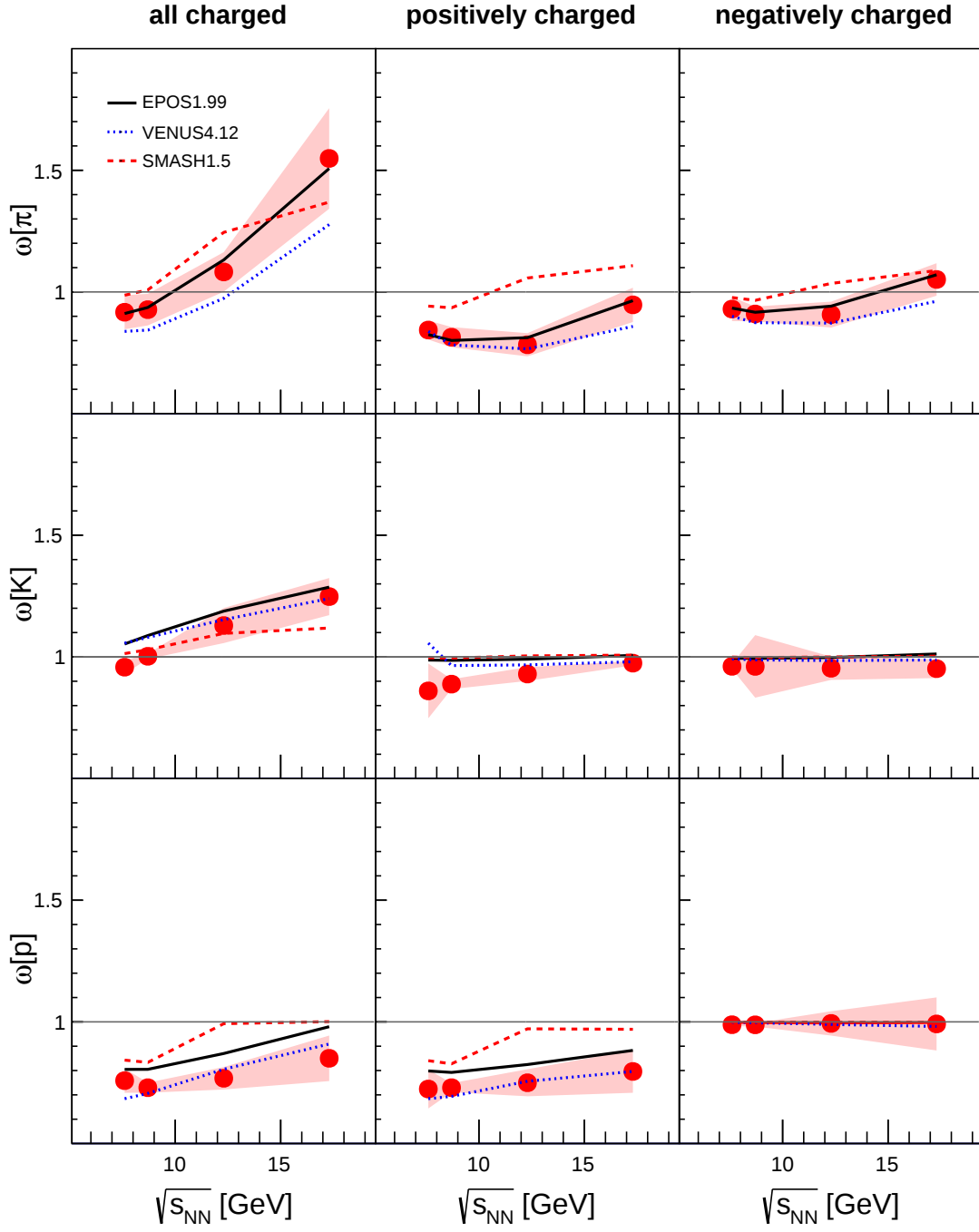
Rysunek 9: Rozkład prawdopodobieństwa, że dana cząstka jest π^+ (lewy panel), oraz rozmyty rozkład krotności π^+ w zderzeniach $p+p$ przy pędzie wiązki 158 GeV/c (prawy panel) [H4].

analiz cząstek naładowanych w pełnej przestrzeni fazowej. W niższych energiach zjawisko to jest słabiej zaznaczone, prawdopodobnie ze względu na dominujący udział protonów w wyprodukowanych cząstkach, co tłumi względne fluktuacje. Oddzielna analiza pionów dodatnich i ujemnych ujawnia podobny wzrost skalowanej wariancji jedynie przy dwóch najwyższych energiach, przy czym sam efekt jest wyraźnie słabszy. Wynik ten pozostaje w zgodzie z przewidywaniami modeli teoretycznych (por. Ref. [21]), które wskazują na istotną zależność sygnału fluktuacji od liczby nośników danego ładunku oraz od wartości netto-ładunku, którą układ musi zachować. Niższa wartość sygnału dla π^+ też zgodna jest z przewidywaniami teoretycznymi gdy układ ma netto-ładunek większy od zera. W przypadku fluktuacji kaonów nie widoczna jest taka asymetria (netto-ładunek dziwny wynosi 0) więc K^+ i K^- zachowują się tak samo. Większe fluktuacje naładowanych kaonów są interpretowane jako wpływ produkcji kwarków dziwnych w parach z anty-dziwnymi.

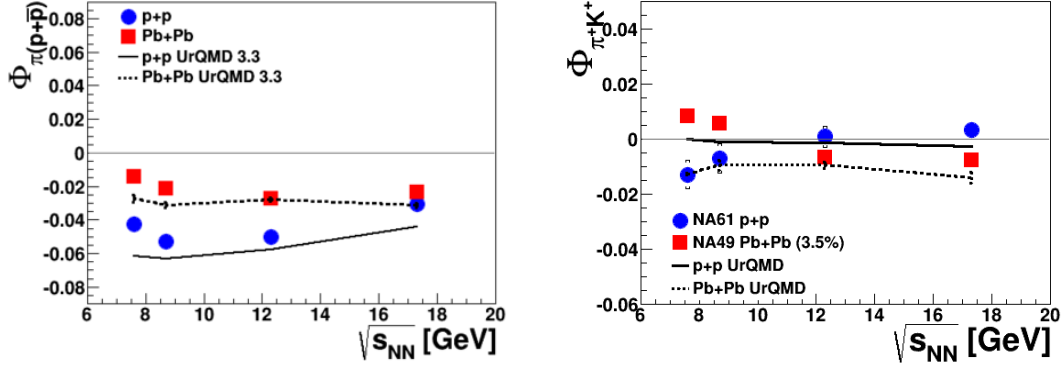
Fluktuacje protonów rozumiane są w kontekście wpływu zasady zachowania ładunku. Są to cięższe cząstki, na które przy energiach SPS znacząco wpływa zasada zachowania ładunku barionowego. Podobnie fluktuacje antyprotonów są bliskie jeden co jest zgodne z przewidywaniami [21]. Podobnie jak w przypadku fluktuacji cząstek naładowanych, po uwzględnieniu różnicy w objętości systemu sygnał mierzony w reakcjach $p+p$ i Pb+Pb jest porównywalny (rys. 11) i zbliżone do przewidywań modelu UrQMD [H8]. W porównaniu fluktuacji chemicznych w reakcjach $p + p$ oraz Pb+Pb widoczna jest różnica w zależności od energii fluktuacji π^+ oraz K^+ (prawy panel Fig. 11). Co ciekawe nie odtwarza tego zachowania model UrQMD [65, 66]. Warto zaznaczyć, że zmiana wartości zmiennej Φ następuje dla energii bliskich energiom maksimum struktury horn interpretowanym jako sygnał przejścia fazowego [H8, 67].

6 Podsumowanie

Obecnie uzyskane wyniki analiz skupionych na poszukiwaniu punktu krytycznego (CP) w ramach programu jonowego NA61/SHINE wskazują na brak jego sygnatur. Analizy kształtu źródła prowadzone metodami femtoskopowymi [55, 56], analiza intermitencji (fluktuacji gęstości) [57, 58] oraz badania fluktuacji krotności cząstek naładowanych i netto-ładunku [H3, H9, H10, H11] są w tym kontekście spójne. Sygnały zmierzone w zderzeniach $p+p$ oraz Ar+Sc są zbliżone co do wielkości. Niemniej zależności od energii różnią się a największa różnica jest obserwowana w okolicy pędu wiązki 30A GeV/c dla fluktuacji krotności i korelacji kwantowych. Analiza inter-



Rysunek 10: Zależność od energii skalowanej wariacji różnych ładunków π , K oraz p i $\bar{p}$ w zderzeniach $p+p$ przy pędach wiązki 20, 31, 40, 80 i 158 GeV/c [H4]. Dane porównane są z przewidywaniami modeli EPOS1.99, Venus4.12 oraz SMASH1.5. Niepewność statystyczna jest mniejsza od rozmiaru punktów, natomiast niepewność systematyczna została zaznaczona czerwonym pasem.



Rysunek 11: Zależność od energii $\Phi_{\pi(p+\bar{p})}$ i $\Phi_{\pi+K^+}$ w zderzeniach $p+p$ [H4] i $Pb+Pb$ [H8].

mitencji oraz korelacji femtoskopowych wskazują na brak sygnatury CP w zderzeniach $Ar+Sc$. Również porównanie zderzeń $p+p$ do $Pb+Pb$ nie wskazuje na obecność CP w tych zderzeniach choć może wskazywać sam fakt przejścia fazowego [H8].

Eksperyment STAR [47] zaobserwował różnicę między danymi eksperymentalnymi a symulacjami modelowymi, w których nie występuje efekt CP dla energii zderzenia $\sqrt{s_{NN}} = 20$ GeV. Najwyższa energia w zderzeniach jon+jon dostępna w eksperymencie NA61/SHINE wynosi 17.3 GeV więc pomiar porównawczy jest niemożliwy natomiast NA61/SHINE w 2025 oraz w 2016 roku zbierał dane referencyjne $p+p$ dla energii $\sqrt{s_{NN}} = 23.8$ i 27.4 GeV co pozwoli na porównanie wyników STAR z reakcją referencyjną.

W kontekście analiz fluktuacji krotności oraz netto-ładunku w eksperymencie NA61/SHINE kolejnym krokiem będzie analiza netto-ładunku barionowego w zderzeniach $p+p$, a także w zderzeniach $O+O$ [59]. Planowane są również analizy skalowanej wariancji i znormalizowanej skośności dla cięższych systemów ($Xe+La$ oraz $Pb+Pb$). Niepewność statystyczna znormalizowanej skośności i kurtozy zależą od dostępnej liczby zarejestrowanych zderzeń oraz rozmiaru układu — stąd znacząca niepewność w analizie systemu $Ar+Sc$ oraz rezygnacja z pomiaru znormalizowanej kurtozy dla jeszcze cięższych układów. Nadal jednak możliwa pozostaje analiza zmiennych silnie intensywnych w szerszym przedziale centralności niż dotychczas — tj. poza 0-1% najbardziej centralnych zderzeń w zderzeniach jon+jon.

Literatura

- [1] W. Florkowski, *Phenomenology of Ultra-Relativistic Heavy-Ion Collisions*. World Scientific, Singapore, 2010.
- [2] M. Gazdzicki, *The European Physical Journal Special Topics* **229** no. 22–23, (2020) 3443–3455. <https://link.springer.com/article/10.1140/epjst/e2020-000090-9>. Figure adapted from the review of heavy-ion research at the CERN SPS.
- [3] F. Gao and J. M. Pawłowski, *Phys. Rev. D* **102** no. 3, (2020) 034027, [arXiv:2002.07500](https://arxiv.org/abs/2002.07500) [hep-ph].
- [4] **Particle Data Group** Collaboration, S. Navas *et al.*, *Phys. Rev. D* **110** no. 3, (2024) 030001.
- [5] V. Volodymyr, M. I. Gorenstein, and H. Stoecker, *Phys. Rev. Lett.* **118** (May, 2017) 182301. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.118.182301>.
- [6] V. Vovchenko, D. V. Anchishkin, M. I. Gorenstein, and R. V. Poberezhnyuk, *Phys. Rev. C* **92** (Nov, 2015) 054901. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.92.054901>.
- [7] K. Redlich and K. Zalewski, *Acta Phys. Polon. B* **47** (2016) 1943, [arXiv:1605.09686](https://arxiv.org/abs/1605.09686) [cond-mat.quant-gas].

- [8] **HotQCD** Collaboration, A. Bazavov *et al.*, *Phys. Lett. B* **795** (2019) 15–21, [arXiv:1812.08235 \[hep-lat\]](#).
- [9] S. Borsanyi, Z. Fodor, J. N. Guenther, R. Kara, S. D. Katz, P. Parotto, A. Pasztor, C. Ratti, and K. K. Szabo, *Phys. Rev. Lett.* **125** no. 5, (2020) 052001, [arXiv:2002.02821 \[hep-lat\]](#).
- [10] N. G. Antoniou and A. S. Kapoyannis, *Phys. Lett. B* **563** (2003) 165–172, [arXiv:hep-ph/0211392](#).
- [11] C. S. Fischer, J. Luecker, and C. A. Welzbacher, *Phys. Rev. D* **90** no. 3, (2014) 034022, [arXiv:1405.4762 \[hep-ph\]](#).
- [12] M. Gazdzicki and M. I. Gorenstein, *Acta Phys. Polon. B* **30** (1999) 2705, [arXiv:hep-ph/9803462](#).
- [13] K. Nagata, *Progress in Particle and Nuclear Physics* **127** (2022) 103991, [arXiv:2108.12423 \[hep-lat\]](#).
- [14] M. A. Stephanov, *Nucl. Phys. A* **661** (1999) 403–406, [arXiv:hep-ph/9907312](#).
- [15] M. Asakawa and M. Kitazawa, *Prog. Part. Nucl. Phys.* **90** (2016) 299–342, [arXiv:1512.05038 \[nucl-th\]](#).
- [16] **NA49-future** Collaboration, M. Gazdzicki and G. Vesztergombi, “Study of Hadron Production in Collisions of Protons and Nuclei at the CERN SPS”, tech. rep., CERN, Geneva, 2006. <https://cds.cern.ch/record/919966>. revised version submitted on 2006-03-31 17:22:05.
- [17] **NA49-future** Collaboration, M. Gazdzicki, Z. Fodor, and G. Vesztergombi, “Study of Hadron Production in Hadron-Nucleus and Nucleus-Nucleus Collisions at the CERN SPS”, tech. rep., CERN, Geneva, 2006. <https://cds.cern.ch/record/995681>. revised version submitted on 2006-11-06 12:38:20.
- [18] **STAR** Collaboration, M. M. Aggarwal *et al.*, “An Experimental Exploration of the QCD Phase Diagram: The Search for the Critical Point and the Onset of De-confinement”, tech. rep., 7, 2010. [arXiv:1007.2613 \[nucl-ex\]](#).
- [19] STAR Collaboration, “Studying the phase diagram of qcd matter at rhic: Star note sn0598”, tech. rep., Brookhaven National Laboratory, RHIC/STAR, 2014. https://drupal.star.bnl.gov/STAR/files/BES_WPII_ver6.9_Cover.pdf. White paper for Beam Energy Scan Phase II (original release March 28, 2014; version June 2, 2014).
- [20] GSI, *An international accelerator facility for beams of ions and antiprotons : conceptual design report*. GSI, Darmstadt, 2001. <https://repository.gsi.de/record/67251>.
- [21] F. Becattini, A. Keranen, L. Ferroni, and T. Gabbriellini, *Phys. Rev. C* **72** (2005) 064904, [arXiv:nucl-th/0507039](#).
- [22] R. V. Poberezhnyuk, V. Vovchenko, O. Savchuk, V. Koch, M. I. Gorenstein, and H. Stoecker, *EPJ Web Conf.* **276** (2023) 01005, [arXiv:2210.02960 \[hep-ph\]](#).
- [23] M. Gazdzicki, M. I. Gorenstein, and P. Seyboth, *Int. J. Mod. Phys. E* **23** (2014) 1430008, [arXiv:1404.3567 \[nucl-ex\]](#).
- [24] **NA49** Collaboration, K. Grebieszko, *Nucl. Phys. A* **830** (2009) 547C–550C, [arXiv:0907.4101 \[nucl-ex\]](#).
- [25] **NA61** Collaboration, N. Abgrall *et al.*, *JINST* **9** (2014) P06005, [arXiv:1401.4699 \[physics.ins-det\]](#).
- [26] **NA61/SHINE** Collaboration, N. Antoniou *et al.*, “Study of hadron production in hadron-nucleus and nucleus-nucleus collisions at the CERN SPS”, 2006. CERN-SPSC-2006-034.
- [27] M. A. Stephanov, *Phys. Rev. Lett.* **107** (2011) 052301, [arXiv:1104.1627 \[hep-ph\]](#).
- [28] E. V. Shuryak and M. A. Stephanov, *Phys. Rev. C* **63** (2001) 064903, [arXiv:hep-ph/0010100](#).
- [29] V. Begun, M. I. Gorenstein, M. Hauer, V. Konchakovski, and O. Zozulya, *Phys. Rev. C* **74** (2006) 044903, [arXiv:nucl-th/0606036 \[nucl-th\]](#).
- [30] **NA61/SHINE** Collaboration, A. Aduszkiewicz *et al.*, *Eur. Phys. J. C* **77** no. 10, (2017) 671, [arXiv:1705.02467 \[nucl-ex\]](#).
- [31] T. Anticic *et al.*, *Phys. Rev. C* **89** no. 5, (2014) 054902, [arXiv:1310.3428 \[nucl-ex\]](#).
- [32] **BNL-Bielefeld** Collaboration, M. Wagner, *PoS LATTICE2013* (2014) 159, [arXiv:1311.3965 \[hep-lat\]](#).
- [33] V. Begun, [arXiv:1606.05358 \[nucl-th\]](#).
- [34] E. Sangaline, [arXiv:1505.00261 \[nucl-th\]](#).
- [35] V. Begun and M. Mackowiak-Pawłowska, *PoS CPOD2017* (2018) 065, [arXiv:1712.05805 \[nucl-th\]](#).
- [36] **STAR** Collaboration, X. Luo, *PoS CPOD2014* (2015) 019, [arXiv:1503.02558 \[nucl-ex\]](#).

- [37] V. Skokov, B. Friman, and K. Redlich, *Phys. Rev. C* **88** (2013) 034911, [arXiv:1205.4756 \[hep-ph\]](#).
- [38] H. Heiselberg, *Phys. Rept.* **351** (2001) 161–194, [arXiv:nuc1-th/0003046](#).
- [39] Z. Koba, H. B. Nielsen, and P. Olesen, *Nucl. Phys. B* **40** (1972) 317–334.
- [40] A. I. Golokhvastov, *Phys. Atom. Nucl.* **64** (2001) 84–97.
- [41] A. I. Golokhvastov, *Phys. Atom. Nucl.* **64** (2001) 1841–1855.
- [42] G. Wrochna, “Warsaw university preprint ifd/5/1990”, tech. rep., Institute of Experimental Physics, University of Warsaw, 1990.
- [43] M. Gazdzicki, R. Szwed, G. Wrochna, and A. K. Wroblewski, *Mod. Phys. Lett. A* **6** (1991) 981–992.
- [44] G. Wrochna, “Warsaw university preprint ifd/9/1990”, tech. rep., Institute of Experimental Physics, University of Warsaw, 1990.
- [45] **NA49** Collaboration, C. Alt *et al.*, *Phys. Rev. C* **78** (2008) 034914, [arXiv:0712.3216 \[nucl-ex\]](#).
- [46] B. Friman, K. Redlich, and A. Rustamov, [arXiv:2508.18879 \[nucl-th\]](#).
- [47] **STAR** Collaboration, B. E. Aboona *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **135** no. 14, (2025) 142301, [arXiv:2504.00817 \[nucl-ex\]](#).
- [48] M. Gazdzicki, K. Grebieszko, M. Mackowiak, and S. Mrowczynski, *Phys. Rev. C* **83** (2011) 054907, [arXiv:1103.2887 \[nucl-th\]](#).
- [49] M. I. Gorenstein and M. Gazdzicki, *Phys. Rev. C* **84** (2011) 014904, [arXiv:1101.4865 \[nucl-th\]](#).
- [50] M. Gazdzicki, M. I. Gorenstein, and M. Mackowiak-Pawlowska, *Phys. Rev. C* **88** no. 2, (2013) 024907, [arXiv:1303.0871 \[nucl-th\]](#).
- [51] T. Nonaka, M. Kitazawa, and S. Esumi, *Nucl. Instrum. Meth. A* **906** (2018) 10–17, [arXiv:1805.00279 \[physics.data-an\]](#).
- [52] M. Barej and A. Bzdak, *Phys. Rev. C* **102** no. 6, (2020) 064908, [arXiv:2006.02836 \[nucl-th\]](#).
- [53] **NA61/SHINE** Collaboration, A. Borucka, *Moscow Univ. Phys. Bull.* **77** no. 2, (2022) 178–179.
- [54] **NA49** Collaboration, T. Anticic *et al.*, *Phys. Rev. C* **92** no. 4, (2015) 044905, [arXiv:1509.04633 \[nucl-ex\]](#).
- [55] **NA61/SHINE** Collaboration, H. Adhikary *et al.*, *Eur. Phys. J. C* **83** no. 10, (2023) 919, [arXiv:2302.04593 \[nucl-ex\]](#).
- [56] **NA61/SHINE** Collaboration, B. Porfy, *PoS ICHEP2024* (2025) 603, [arXiv:2410.13975 \[nucl-ex\]](#).
- [57] **NA61/SHINE** Collaboration, H. Adhikary *et al.*, *Eur. Phys. J. C* **84** no. 7, (2024) 741, [arXiv:2401.03445 \[nucl-ex\]](#).
- [58] **NA61/SHINE** Collaboration, H. Adhikary *et al.*, *Eur. Phys. J. C* **83** no. 9, (2023) 881, [arXiv:2305.07557 \[nucl-ex\]](#).
- [59] **NA61/SHINE** Collaboration, M. Mackowiak-Pawlowska, “Addendum to the NA61/SHINE Proposal: Request for light ions beams in Run 4”, tech. rep., CERN, Geneva, 2023. <https://cds.cern.ch/record/2867952>.
- [60] J. Włodarczyk, “Analysis of the energy dependence of identified hadron fluctuations in p+p interactions collected by the na61/shine experiment”, praca magisterska, Politechnika Warszawska, Warszawa, June, 2024. Promotor: dr inż. Maja Maćkowiak-Pawlowska.
- [61] **NA61/SHINE** Collaboration, A. Acharya *et al.*, *Eur. Phys. J. C* **82** no. 4, (2022) 322, [arXiv:2112.09506 \[nucl-ex\]](#).
- [62] M. Arslanovic and A. Rustamov, *Nucl. Instrum. Meth. A* **946** (2019) 162622, [arXiv:1807.06370 \[hep-ex\]](#).
- [63] **ALICE** Collaboration, A. Coll., *Phys. Lett. B* **807** (2020) 135564, [arXiv:1910.14396 \[nucl-ex\]](#).
- [64] M. Gazdzicki, M. I. Gorenstein, M. Mackowiak-Pawlowska, and A. Rustamov, *Nucl. Phys. A* **1001** (2020) 121915, [arXiv:1903.08103 \[nucl-th\]](#).
- [65] S. A. Bass *et al.*, *Prog. Part. Nucl. Phys.* **41** (1998) 255–369, [arXiv:nuc1-th/9803035](#).
- [66] M. Bleicher *et al.*, *J. Phys. G* **25** (1999) 1859–1896, [arXiv:hep-ph/9909407](#).
- [67] **NA61/SHINE** Collaboration, H. Adhikary *et al.*, *Eur. Phys. J. C* **84** no. 4, (2024) 416, [arXiv:2308.16683 \[nucl-ex\]](#).

Achievement references

- [H1] **Maćkowiak-Pawłowska, M.** and P. Przybyła, *Eur.Phys.J.C* **78** , **5** (2018) 391, [arXiv:1702.07233](#) [[hep-ex](#)].
- [H2] M. Gazdzicki, M. I. Gorenstein, **Mackowiak-Pawłowska, M.**, and A. Rustamov, *Nucl. Phys. A* **1001** (2020) 121915, [arXiv:1903.08103](#) [[nucl-th](#)].
- [H3] **NA61/SHINE** Collaboration, H. Adhikary *et al.*, *Eur. Phys. J. C* **84** (2024) 921, [arXiv:2312.13706](#) [[hep-ex](#)]. [Erratum: *Eur.Phys.J.C* 85, 341 (2025)].
- [H4] **NA61/SHINE** Collaboration, A. Acharya *et al.*, *Eur. Phys. J. C* **81** no. 5, (2021) 384, [arXiv:2009.01943](#) [[nucl-ex](#)].
- [H5] **Mackowiak-Pawłowska, M.**, M. Naskręt, and M. Gazdzicki, *Nucl. Phys. A* **1014** (2021) 122258, [arXiv:2102.11186](#) [[hep-ex](#)].
- [H6] M. Gazdzicki, M. I. Gorenstein, and **Maćkowiak-Pawłowska, M.**, *Phys. Rev. C* **88** no. 2, (2013) 024907, [arXiv:1303.0871](#) [[nucl-th](#)].
- [H7] M. Gazdzicki, M. I. Gorenstein, A. Fronczak, P. Fronczak, and **Mackowiak-Pawłowska, M.**, *Int. J. Mod. Phys. E* **26** no. 12, (2017) 1750085, [arXiv:1704.01878](#) [[nucl-th](#)].
- [H8] **Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE Collaboration), **M.**, *Nucl. Phys. A* **956** (2016) 344–347, [arXiv:1602.03682](#) [[nucl-ex](#)].
- [H9] **Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE Collaboration), **M.**, *Nucl. Phys. A* **1005** (2021) 121753, [arXiv:2002.04847](#) [[nucl-ex](#)].
- [H10] **Maćkowiak-Pawłowska**(for the NA61/SHINE Collaboration), **M.**, *PoS PANIC2021* (2022) 238, [arXiv:2112.01877](#) [[nucl-ex](#)].
- [H11] **NA61/SHINE** Collaboration, H. Adhikary *et al.*, *Eur. Phys. J. C* **85** no. 8, (2025) 918, [arXiv:2503.22484](#) [[nucl-ex](#)].

5. Inna istotna aktywność naukowa

Opis główny

Zajmuję się fluktuacjami cząstek od kiedy dołączyłam do kolaboracji NA49, a następnie do kolaboracji NA61/SHINE w 2009 r. W trakcie swojej kariery naukowej miałam dwie przerwy związane z urlopem macierzyńskim w latach 2014 i 2017. W początkowym okresie zajęłam się fluktuacjami cząstek zidentyfikowanych w eksperymencie NA49. Fluktuacje te czule są na niepoprawną identyfikację cząstek. Problemy związane z tym pomiarem spowodowały, że przy moim współudziale opracowana została pierwsza wersja metody identity (pozwalającej na poprawę momentów rozkładu na rozdzielczość identyfikacji) - odpowiadałam za wykonanie symulacji. Następnie w ramach eksperymentu NA61/SHINE uczestniczyłam w zbieraniu, kalibracji oraz analizie danych w ramach programu jonowego kolaboracji. W grupie NA61/SHINE na Politechnice Warszawskiej pełnię rolę zastępcy kierownika grupy. Moja znajomość analiz w tym szczególnie analiz fluktuacji i w reakcji $p+p$ spowodowały, że zostałam wyznaczona na przewodniczącą rady redakcyjnej trzech publikacji przygotowanych w ramach kolaboracji NA61/SHINE:

- Two-pion femtoscopic correlations in Be+Be collisions at $\sqrt{s_{NN}}=16.84$ GeV measured by the NA61/SHINE at CERN, **NA61/SHINE Coll.**, Eur.Phys.J.C 83 (2023) 10, 919
- Search for the critical point of strongly-interacting matter in $^{40}\text{Ar}+^{45}\text{Sc}$ collisions at $150A$ GeV/c using scaled factorial moments of protons, **NA61/SHINE Coll.**, Eur.Phys.J.C 83 (2023) 9, 881
- $K^*(892)^0$ meson production in inelastic $p+p$ interactions at 40 and 80 GeV/c beam momenta measured by NA61/SHINE at the CERN SPS, **NA61/SHINE Coll.**, Eur.Phys.J.C 82 (2022) 4, 322

W ramach rozwoju analiz od 2016 roku rozwijam implementację nowoczesnych metod oszacowania i poprawy danych na wydajność detektora NA61/SHINE. Wprowadziłam metodę unfoldingu do analizy cząstek niezidentyfikowanych w NA61/SHINE w zderzeniach $p+p$, a wraz z dr inż. Justyną Cybowską również w zderzeniach $\text{Ar}+\text{Sc}$. Byłam również promotorem pomocniczym rozprawy doktorskiej dr inż. Justyny Cybowskiej pt. *Multiplicity and net-electric charge fluctuations in central Ar+Sc interactions at SPS energies measured in the NA61/SHINE experiment*. Od października 2018 r. do maja 2025 r. kierowałam pracą grupy Monte Carlo, której zadaniem jest przygotowanie masowych danych symulacyjnych na potrzeby wszystkich analiz wykonywanych w ramach prac kolaboracji.

Od września 2022 r. reprezentuję eksperyment NA61/SHINE w Physics Beyond Colliders - grupie w strukturach CERN, której zadaniem jest eksploracja pełnego potencjału naukowego akceleratorów w CERNie oraz jego zaplecza technologicznego. W ramach prac tej grupy uczestniczyłam w przygotowaniu raportu dotyczącego zastosowania wiązek jonowych na akceleratorze SPS (CERN-PBC-REPORT-2025-002) oraz uczestniczyłam w przygotowaniu kontrybucji PBC do europejskiej strategii fizyki cząstek na lata 2025-2030 (CERN-PBC-REPORT-2025-003). W 2023 r. kierowałam opracowaniem wniosku o przedłużenia programu badawczego kolaboracji NA61/SHINE o pomiar lekkich systemów takich jak $\text{O}+\text{O}$ czy $\text{Mg}+\text{Mg}$ (CERN-SPSC-2023-022). Również w 2023 r. byłam jednym z koordynatorów przygotowania rocznego raportu kolaboracji NA61/SHINE do komitetu SPS (CERN-SPSC-2023-030) nadzorującego przyznanie wiązki projektom naukowym na akceleratorze SPS. W maju 2025 r. podjęłam się roli współkoordynatora analiz związanych z badaniem oddziaływań silnych w NA61/SHINE oraz Physics Coordinator podczas kompanii pomiarowej dedykowanej zderzeniom $p+p$ w dniach 27.10-10.11.2025.

Praca na Politechnice Warszawskiej dała mi możliwość pracy z wieloma osobami zarówno w ramach pracy naukowej jak i dydaktycznej. Jestem promotorem pięciu prac magisterskich oraz czterech prac inżynierskich. Uczestniczę również jako sekretarz obron magisterskich na specjalności Fizyka i Techniki Jądrowe od 2019. Uczestniczyłam w czterdziestu jeden obronach.

5. Inna istotna aktywność naukowa (kontynuacja)

Kierowanie projektami badawczymi

Projekty, w których pełnię rolę Kierownika Projektu

Po otrzymaniu stopnia doktora

<i>Instytucja</i>	<i>Szczegóły projektu</i>
NCN SONATA	<i>Zbadanie fluktuacji wyższych momentów rozkładów netto-ładunku i krotkości cząstek wyprodukowanych w wysoko energetycznych zderzeniach jądrowych przy energiach akceleratora SPS zebranych przez eksperyment NA61/SHINE</i> nr rej. 2016/21/D/ST2/01983 okres: 6.02.2017 - 21.10.2021 kwota: 197 860 PLN
PW IDUB	<i>Badanie fluktuacji oraz produkcji hadronów w zderzeniach jonów w eksperymencie NA61/SHINE</i> konkurs: IDUB-POB-FWEiTE-1 nr por. 1820/16/Z01/POB6/2020 okres: 1.07.2020 - 31.12.2021 kwota: 252 046 PLN <i>Podtrzymanie i rozwinięcie kluczowej roli grupy PW w kolaboracji NA61/SHINE</i> konkurs: CP POB FWEiTE nr por. CPR-IDUB/151/Z01/POB6/2024 okres: 6.05.2024 - 31.12.2025 kwota: 219 650 PLN
Granty dziekańskie	<i>Granty dziekańskie Wydziału Fizyki PW dla Młodych Naukowców w latach 2014, 2016, 2018 i 2019 r.</i> 2014: <i>Modelowanie korelacji dwucząstkowych w kącie azymutalnym i pseudo-pośpieszności oraz fluktuacji w krotkości i składzie produkowanych cząstek w zderzeniach jądrowych przy energiach akceleratora SPS</i> , kwota: 10 198 PLN 2016: <i>Wpływ rozpadów rezonansów na produkcję i fluktuacje rozkładów dodatnich, ujemnych hadronów i net-ładunku w zderzeniach p+p i Be+Be przy energiach akceleratora SPS</i> , kwota: 9 000 PLN 2018: <i>Wpływ rozmiaru systemu na fluktuacje netto ładunku i krotkości w zderzeniach Ar+Sc przy pędzie wiązki 75A GeV</i> , kwota: 4 525 PLN 2019: <i>Przewidywania modelu EPOS fluktuacji krotkości cząstek naładowanych i netto ładunku w zderzeniach Ar+Sc przy pędach wiązki 19A, 30A, 40A i 150A GeV/c</i> , kwota: 7 000 PLN

Uczestnictwo w projektach naukowych

Projekty finansowane ze źródeł zewnętrznych, w których występuję jako Wykonawca

Po uzyskaniu stopnia doktora

<i>Instytucja</i>	<i>Szczegóły projektu</i>
MEiN	<i>Eksperyment NA61/SHINE w CERN</i> projekt realizowany w ramach konsorcjum Hadrony (lider: Uniwersytet Jagielloński) nr umowy 2021/WK/10

5. Inna istotna aktywność naukowa (kontynuacja)

MNiSW	<i>Eksperyment NA61/SHINE w CERN</i> projekt realizowany w ramach konsorcjum Hadrony (lider: UJ) nr rej. DIR/WK/2016/2017/10-1
NCN HARMONIA	<i>Badanie zderzeń proton-proton, hadron-jądro oraz jądro-jądro przy relatywistycznych energiach w ramach eksperymentu NA61 SHINE przy CERN SPS - II etap</i> projekt przyznany konsorcjum Hadrony (lider: UJ) nr rej. 2015/18/M/ST2/00125
Przed uzyskaniem stopnia doktora	
Instytucja	Szczegóły projektu
NCN HARMONIA	<i>Badanie zderzeń proton-proton, hadron-jądro oraz jądro-jądro przy relatywistycznych energiach w ramach eksperymentu NA61 SHINE przy CERN SPS</i> nr rej. 2012/04/M/ST2/00816 projekt przyznany konsorcjum Hadrony (lider: UJ)
German Research Foundation	<i>Experiment NA61/SHINE at the CERN SPS: Search for the Critical Point and Study of the Onset of Deconfinement</i> kierownik projektu: prof. Marek Gazdzicki (IKF, Goethe University)

Outreach project

After Ph.D.

Institution	Project details
Masterclass	Koordinuję przygotowanie i przeprowadzenie zajęć Masterclass z radioterapii. Są to jednodniowe zajęcia, organizowane co roku dla licealistów z podstaw oraz planowania radioterapii we współpracy z ośrodkiem GSI w Niemczech. Terminy zajęć: 23.11.2021; 23.03.2024; 01.03.2025
Wykład popularnonaukowy	Wykład popularnonaukowy pt. <i>Czym jest materia</i> . 21.01.2016 – prezentacja dla uczniów liceum im. Marszałka Józefa Piłsudskiego w Garwolinie; 12.04.2024 w XIX Liceum Ogólnokształcące im. Powstańców Warszawy w Warszawie, dwukrotnie na Politechnice Warszawskiej dla wizytujących klas
Zajęcia edukacyjne	Zajęcia z elektroniki dla uczniów klas 4-8 w Mikroszkoła Włochy w ramach programu Laboratorium Przyszłości od 2022 roku
Zajęcia edukacyjne	Zajęcia o strukturze materii przeznaczone dla dzieci wczesnoszkolnych i przedszkolnych prowadzone w latach 2020-2022

Zagraniczne pobyty naukowe

Po uzyskaniu stopnia doktora

2016 – ..	Coroczne tygodniowe pobyty w CERN (ze statusem CERN User), Frankfurt (wizytujący naukowiec), czy w Kielcach finansowane z różnych źródeł w tym CERN, NCN, itp. Łączny okres pobyt w różnych ośrodkach naukowych około sześć miesięcy.
2010 – ..	Dwa coroczne tygodniowe spotkania kolaboracji NA49 lub NA61/SHINE w instytucjach goszczących takich jak CERN, Szwajcaria, Université Pierre et Marie Curie, Francja; Inter University Centre Dubrovnik, Chorwacja; Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski.

5. Inna istotna aktywność naukowa (kontynuacja)

Przed uzyskaniem stopnia doktora

2011-2014 Studia doktoranckie odbyłam w Institut für Kernphysik, Goethe-Universität Frankfurt w grupie prof. Marka Gazdzickiego

Wystąpienia na konferencjach międzynarodowych

Wystąpienia zaproszone

Po uzyskaniu stopnia doktora

- 1 **M. Maćkowiak-Pawłowska**, *NA61/SHINE light-ion physics program*, Light ion collisions at LHC, CERN, 2024
- 2 **M. Maćkowiak-Pawłowska**, *Requests from the North Area experiments for ion beams*, Injectors and Experiments Facilities Workshop, CERN, 2021
- 3 **M. Maćkowiak-Pawłowska**, *Identity and Particle-Set methods to study multiplicity fluctuations at SPS energies*, NICA Days, Warszawa, 2021
- 4 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE), *News on fluctuations and correlations from the NA61/SHINE experiment*, 48th International Symposium on Multi-particle Dynamics, Singapur, 2018

Wystąpienia, na których reprezentowałam zaproszona kolaborację NA49 i/lub NA61/SHINE

- 1 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE), *NA61/SHINE future plans*, Town meeting: heavy ion and QGP physics at CERN, CERN, 2025
- 2 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE), *Ion beams in the North Area: NA61++*, PBC Annual Workshop, CERN, 2024
- 3 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE), *Status of the proposals: NA61++*, konferencja PBC Annual Workshop, CERN, 2022
- 4 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE), *Recent results from NA61/SHINE*, Excited QCD, Portugal, 2017

Przed uzyskaniem stopnia doktora

- 1 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA49), *New results from fluctuation analysis in NA49 at the CERN SPS*, 7th International Workshop on Critical Point and Onset of Deconfinement, Chiny, 2011

Wystąpienia zgłoszone

Po uzyskaniu stopnia doktora

- 1 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE), *NA61/SHINE results on multiplicity and net-charge fluctuations at CERN SPS energies*, the XXXI International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions - Quark Matter 2025, Frankfurt nad Menem, Niemcy, 2025
- 2 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE), 19th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD 2023), Portugal, 2023
- 3 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE), *Fluctuations and correlations in nucleus-nucleus collisions observed by NA61/SHINE at CERN SPS energies*, Critical Point and Onset of Deconfinement (CPOD2021), online, 2021

5. Inna istotna aktywność naukowa (kontynuacja)

- 4 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE), *Study of the phase diagram of strongly interacting matter in the NA61/SHINE experiment*, Particles and Nuclei International Conference (PANIC 2021), online, Portugal, 2021
- 5 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE), *NA61/SHINE results on fluctuations and correlations at CERN SPS energies*, The XXVIIIth International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions - Quark Matter 2019, Chiny, 2019
- 6 V. Begun, **M. Maćkowiak-Pawłowska**, *Multimoment-moment cancelation of participant fluctuations*, 11th International Workshop on Critical Point and Onset of Deconfinement (CPOD 2017), Stony Brook, US, 2017
- 7 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE), *Recent results on fluctuations from the NA61/SHINE strong*, XII Polish Workshop on Relativistic Heavy-Ion Collisions, Kielce, 2016
- 8 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE), *Higher order moments of net-charge and multiplicity distribution in p+p interactions at SPS*, 10th International Workshop on Critical Point and Onset of Deconfinement (CPOD 2016), Wrocław, 2016
- 9 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE), *NA61/SHINE results on fluctuations and correlations in p+p and Be+Be interactions at CERN SPS energies*, The XXV International Conference On Ultrarelativistic Heavy-Ion Collisions, Japonia, 2015
- 10 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE), *Latest results from the NA61/SHINE beam energy scan with p+p and Be+Be collisions*, ESP-HEP, Austria
- 11 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE), *Fluctuations and correlations from the energy scan in p+p and Be+Be interactions at the SPS energies*, 11-th Polish Workshop on Relativistic Heavy-Ion Collisions, Warszawa, 2015

Przed uzyskaniem stopnia doktora

- 1 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE), *Energy dependence of identified hadron fluctuations in p+p interactions at the CERN SPS*, 8th International Workshop on Critical Point and Onset of Deconfinement (CPOD 2013), USA, 2013
- 2 **Maja Maćkowiak-Pawłowska**, Andrzej Wilczek (for the NA61/SHINE), *Multiplicity fluctuations of identified hadrons in p+p interactions at SPS energies*, 14th International Conference on Strangeness in Quark Matter (SQM2013) (SQM 2013), UK, 2013
M. Maćkowiak-Pawłowska (for the NA61/SHINE), *Energy dependence of chemical fluctuations*, Workshop on Particle Correlations and Fluctuations (WPCF2012), Niemcy, 2012
- 3 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for NA61/SHINE and NA49), 42nd International Symposium on Multiparticle Dynamics, Kielce, 2012

Inne wystąpienia

- 1 **M. Maćkowiak-Pawłowska**, *News from the NA61/SHINE strong-interactions program*, seminarium w Zakładzie Fizyki Jądrowej, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, 2021

6. Osiągnięcia dydaktyczne, organizacyjne i popularyzacja nauki

Opieka nad studentami

Doktoranci

Po uzyskaniu stopnia doktora

<i>Imię</i>	<i>Szczegóły pracy</i>
J. Cybowska	Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki Tytuł pracy: <i>Multiplicity and net-electric charge fluctuations in central Ar+Sc interactions at SPS energies measured in the NA61/SHINE experiment</i> Dyscyplina naukowa: Nauki fizyczne Moja rola: promotor pomocniczy Promotor główny: Prof. dr hab. Katarzyna Grebieszkow Praca obroniona, 21 grudnia 2023

Studenci I oraz II stopnia wykonujący prace dyplomowe pod moją opieką

Wszyscy wymienieni poniżej studenci obronili/przygotowują swoje prace dyplomowe pod moją opieką na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej.

<i>Imię</i>	<i>Szczegóły pracy</i>
N. Grzybicka	Tytuł pracy: <i>Zbadanie zależności fluktuacji krotności cząstek zidentyfikowanych od popieszczości w zderzeniach p+p przy pędzie wiązki 158 GeV/c zebranych przez eksperyment NA61/SHINE</i> Rodzaj dyplomu: magister inżynier Data obrony: 28.06.2024
J. Włodarczyk	Tytuł pracy: <i>Zbadanie zależności fluktuacji krotności cząstek zidentyfikowanych od energii zderzenia w zderzeniach p+p zebranych przez eksperyment NA61/SHINE</i> Rodzaj dyplomu: magister inżynier Data obrony: 24.06.2024 Tytuł pracy: <i>Identyfikacja cząstek w reakcjach p+p przy pędzie wiązki 158 GeV/c</i> Rodzaj dyplomu: inżynier Data obrony: 3.02.2023
A. Goleniewska	Tytuł pracy: <i>Metody prognozowania dokładności realizacji planów radioterapii techniką luków dynamicznych w oparciu o wybrane wskaźniki złożoności planu i obliczania rozkładu dawki w niezależnym oprogramowaniu</i> Rodzaj dyplomu: magister inżynier Data obrony: 15.02.2022
A. Borucka	Tytuł pracy: <i>Zbadanie zależności fluktuacji krotności i netto-ładunku od akceptacji w popieszczości w zderzeniach p+p przy pędzie wiązki 158 GeV/c</i> Rodzaj dyplomu: magister inżynier Data obrony: 18.01.2022
J. Cybowska	Tytuł pracy: <i>Badanie fluktuacji netto ładunku w zderzeniach Ar+Sc przy pędzie wiązki 75 GeV/c</i> Rodzaj dyplomu: magister inżynier Data obrony: 10.09.2018
L. Biardzki	Tytuł pracy: <i>Wpływ wyboru miary centralności na wybrane wielkości mierzone w zderzeniach jon+jon w oparciu o dane symulowane i dane zebrane w eksperymencie NA61/SHINE</i> Rodzaj dyplomu: inżynier Data obrony: 17.02.2026

6. Osiągnięcia dydaktyczne, organizacyjne i popularyzacja nauki (kontynuacja)

M. Szczepkowski **Tytuł pracy:** Weryfikacja jakości danych zarejestrowanych w eksperymencie NA61/SHINE w reakcji $p+p$ przy pędzie wiązki 400 GeV/c na przykładzie analiz rozkładów krotności cząstek
Rodzaj dyplomu: inżynier
Data obrony: 17.02.2026

Inne projekty dydaktyczne

- Studia z IONem Studia z Indywidualnym Opiekunem Naukowym to program kierowany do najlepszych studentów Wydziału Fizyki mający na celu zachęcanie ich do włączenia się w naukową działalność uczelni już na wczesnym etapie studiów (po I roku). Jestem jednym z opiekunów w programie, zachęcając studentów do podjęcia się prac badawczych związanych z tematyką fizyki jądrowej. Sama zostałam opiekunem kilkorga z nich, np. Agnieszki Boruckiej, Tomasza Zawisłaka czy Piotra Karolaka.
- StudiaID StudiaID to indywidualne studia dla najlepszych kandydatów na I i II stopień studiów stacjonarnych na Politechnice Warszawskiej. Dzięki temu programowi zdolne i ambitne osoby mogą uczyć się więcej, szybciej, inaczej niż w standardowym toku kształcenia. Kryterium przyjęcia są bardzo wysokie wyniki w nauce (studia II stopnia) bądź bycie laureatem lub finalistą olimpiad przedmiotowych. Kluczowymi elementami programu jest indywidualny dobór ścieżki studiów, w którego wyborze wspiera studenta przypisany mu tutor oraz specjalne stypendium. Od 2023 r. jestem tutorem w tym programie. W ramach studiówID opiekowałam się trójką studentów: Natalią Grzybicką (II st. studiów), Jakubem Włodarczykiem (II st. studiów) w latach 2023/24 oraz Jakubem Masternakiem (I st. studiów) w latach 2023/24, 2024/25 oraz 2025/26.

Nauczane przedmioty

Po uzyskaniu stopnia doktora

Okres	Przedmiot
2022 – ..	Selected Elements of Astronomy, (https://mmackowi.web.cern.ch/sea.html) – koordynator kursu, przygotowanie i prowadzenie wykładu obieralnego w języku angielskim dla studentów studiów magisterskich (30h).
2024 – ..	Praktyczny warsztat badawczy fizyka: AI, (https://mmackowi.web.cern.ch/ai.html) – przygotowanie (wraz z dr hab. inż. Juliuszem Sienkiewiczem) i prowadzenie zajęć komputerowych poświęconych wykorzystaniu generatywnych modeli AI w pracy studentów (12h) dla studentów pierwszego roku, Wydziału Fizyki
2024 – ..	Praktyczny warsztat badawczy fizyka – prowadzenie części zajęć poświęconych obróbce i analizie danych obejmującej wykorzystanie komputera, przeprowadzenie pomiaru oraz przygotowanie raportu końcowego (27h) dla studentów pierwszego roku, Wydziału Fizyki
2015 – ..	Fizyka 2 – prowadzenie, a od 2019 r. koordynacja laboratorium fizyki (30h) dla studentów Wydziału Matematyki i Technologii Informatycznych
2020 – 2025	Podstawy Projektowania Przyrządów Wirtualnych – przygotowanie części stanowisk oraz prowadzenie laboratoriów (42h) dla studentów III roku Wydziału Fizyki
2017 – 2022	Laboratorium fizyki I – prowadzenie laboratorium (30h) dla studentów I roku Wydziału Fizyki
2015 – 2022	Podstawy Technologii Informatycznych – prowadzenie zajęć komputerowych (30h) dla studentów I roku na Wydziale Fizyki
2015 – 2021	Laboratorium specjalistyczne – prowadzenie zajęć laboratoryjnych (15h) dla studentów III roku na Wydziale Fizyki

6. Osiągnięcia dydaktyczne, organizacyjne i popularyzacja nauki (kontynuacja)

	Laboratorium fizyki jądrowej i technik jądrowych – prowadzenie zajęć laboratoryjnych (12h) dla studentów III roku na Wydziale Fizyki
2015 – 2016	Sieci Komputerowe – prowadzenie zajęć komputerowych (30h) dla studentów III roku na Wydziale Fizyki

Przed uzyskaniem stopnia doktora

2012-2013	F-Praktikum - γ -Spektroskopie – prowadzenie zajęć laboratoryjnych dla studentów III roku Wydziału Fizyki, Goethe University
2010-2011	Fizyka 2 – prowadzenie zajęć laboratoryjnych (30h) dla studentów Wydziału Zarządzania, PW
2010	Podstawy Technologii Informatycznych – prowadzenie zajęć komputerowych (60h) dla studentów I roku na Wydziale Fizyki, PW

Członkostwo i pełnione funkcje, doświadczenie organizacyjne

Po uzyskaniu stopnia doktora

Okres	Organizacja, rola, ...
2017 – 2020	Współ-koordynator grupy Ion Analysis w ramach kolaboracji NA61/SHINE
2018 – 2024	Koordinatorka grupy Monte Carlo w ramach kolaboracji NA61/SHINE
2015 – ..	Zastępca szefa grupy (Deputy Team Leader) PW w eksperymencie NA61/SHINE
2009 – ..	Członek kolaboracji eksperymentu NA61/SHINE za pośrednictwem PW Członek kolaboracji eksperymentu NA49 za pośrednictwem PW
2022 – 2023	Koordinatorka trzech komitetów redakcyjnych (Editorial Boards) dla publikacji przygotowanych przez kolaborację NA61/SHINE
2016 – ..	Sekretarz Komisji Egzaminacyjnej prac magisterskich na specjalizacji Fizyka Komputerowa (jako sekretarz zorganizowałam 41 obron)

Organizacja oraz udział w pracach komitetów programowych konferencji naukowych

Po uzyskaniu stopnia doktora

Nazwa	Rola, informacja na temat konferencji...
2024- ..	Członkini International Advisory Committee serii konferencji Workshop on Critical Point and Onset of Deconfinement (CPOD)
2024-2026	Koordinatorka (wraz z dr Robertą Arnaldi) Lokalnego Komitetu Organizacyjnego konferencji 16th Workshop on Critical Point and Onset of Deconfinement (CPOD), CERN https://indico.cern.ch/event/1438306/
2024	Członkini Lokalnego Komitetu Organizacyjnego konferencji XVII Polish Workshop on Relativistic Heavy-Ion Collisions https://indico.cern.ch/event/1438306/

7. Inne istotne informacje

Nagrody i stypendia

Po uzyskaniu stopnia doktora

2021-2022	Laureatka indywidualnej Nagrody Rektora I stopnia za osiągnięcia naukowe w latach 2020-21
2023	Laureatka Nagrody Rektora za osiągnięcia dydaktyczne w 2022 roku

7. Inne istotne informacje (kontynuacja)

Szkolenia

Po uzyskaniu stopnia doktora

2021-2022	Program Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego Master of Didactics obejmujący tygodniowe szkolenie w Gandawie na Uniwersytecie oraz późniejsze tzw. Good Practice Days (łącznie 100h)
2020-2022	Seria szkoleń dla nauczycieli akademickich w ramach projektu <i>Kompetentny wykładowca</i> : Emisja głosu i dykcja (18h), Sztuka autoprezentacji i prowadzenia dyskusji (24h), Przygotowanie grafiki do celów publikacyjnych i prezentacyjnych (18h), Problem based learning i teamworking (8h)

Wykaz osiągnięć naukowych albo artystycznych, stanowiących znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny

Spis treści

I. Osiągnięcia, o których mowa w art. 219 just. 1. pkt 2 ustawy	2
II. Aktywność naukowa lub artystyczna	3
1. Wykaz opublikowanych artykułów w czasopismach naukowych	3
2. Wystąpienia na krajowych lub międzynarodowych konferencjach naukowych lub artystycznych, z wyszczególnieniem przedstawionych wykładów na zaproszenie i wykładów plenarnych	8
3. Udział w komitetach organizacyjnych i naukowych konferencji krajowych lub międzynarodowych, z podaniem pełnionej funkcji	11
4. Uczestnictwo w pracach zespołów badawczych realizujących projekty finansowane w drodze konkursów krajowych lub zagranicznych, z podziałem na projekty zrealizowane i będące w toku realizacji, oraz z uwzględnieniem informacji o pełnionej funkcji w ramach prac zespołów	11
5. Członkostwo w międzynarodowych lub krajowych organizacjach i towarzystwach naukowych wraz z informacją o pełnionych funkcjach	12
6. Staże w instytucjach naukowych lub artystycznych, w tym zagranicznych, z podaniem miejsca, terminu, czasu trwania stażu i jego charakteru	13
III. Współprace z jednostkami z otoczenia społeczno-gospodarczego	13
IV. Dane naukometryczne	14

I. Osiągnięcia, o których mowa w art. 219 just. 1. pkt 2 ustawy

Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2b ustawy

Tytuł: **Badanie fluktuacji krotności i netto-ładunku cząstek produkowanych w zderzeniach jądrowych przy energiach relatywistycznych**

Lista publikacji

- [H1] **M. Maćkowiak-Pawłowska** i P. Przybyła. „Generalisation of the identity method for determination of high-order moments of multiplicity distributions with a software implementation”. W: *Eur.Phys.J.C* 78, 5 (2018), s. 391. [DOI: 10.1016/j.revip.2016.11.002](https://doi.org/10.1016/j.revip.2016.11.002). arXiv: 1702.07233 [hep-ex].
IF=4.84, pkt MEiN=40, cytowania INSPIRE-HEP=4
Byłam pomysłodawcą przedstawionej pracy. Współtworzyłam tekst manuskryptu oraz przeprowadziłam testy zaproponowanej metody na danych symulowanych. Mój wkład w powstanie publikacji oceniam na około 60%.
- [H2] M. Gazdzicki, M. I. Gorenstein, **Mackowiak-Pawłowska, M.** i A. Rustamov. „Particle-Set Identification method to study multiplicity fluctuations”. W: *Nucl. Phys. A* 1001 (2020), s. 121915. [DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2020.121915](https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2020.121915). arXiv: 1903.08103 [nucl-th].
IF=1.68, pkt MEiN=100, cytowania INSPIRE-HEP=4
Uczestniczyłam w pracach nad opracowaniem metody, przeprowadzeniu symulacji oraz przygotowaniu tekstu publikacji. Mój wkład w powstanie pracy oceniam na około 25%.
- [H3] **NA61/SHINE Collaboration**. „Measurements of higher-order cumulants of multiplicity and net-electric charge distributions in inelastic proton-proton interactions by NA61/SHINE”. W: *Eur. Phys. J. C* 84 (2024). [Erratum: *Eur.Phys.J.C* 85, 341 (2025)], s. 921. [DOI: 10.1140/epjc/s10052-024-13076-y](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-024-13076-y). arXiv: 2312.13706 [hep-ex].
IF=4.8, pkt MEiN=140, cytowania INSPIRE-HEP=5
Byłam głównym autorem (primary author, PA) przedstawionej pracy, odpowiadając za jej realizację od etapu wstępnych analiz aż do finalnej publikacji. Opracowałam selekcję danych oraz przeprowadziłam całość analiz, w tym analizę danych modelowych. Przygotowałam pierwotną wersję manuskryptu oraz wszystkie rysunki. Jako główny autor uczestniczyłam we wszystkich spotkaniach Editorial Board. Po publikacji zidentyfikowałam błąd w przedstawionych wartościach i przygotowałam erratę. Mój wkład w powstanie pracy oceniam na około 90%.
- [H4] **NA61/SHINE Collaboration**. „Measurements of multiplicity fluctuations of identified hadrons in inelastic proton-proton interactions at the CERN Super Proton Synchrotron”. W: *Eur. Phys. J. C* 81.5 (2021), s. 384. [DOI: 10.1140/epjc/s10052-021-09107-7](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-021-09107-7). arXiv: 2009.01943 [nucl-ex].
IF=4.99, pkt MEiN=140, cytowania INSPIRE-HEP=7
Byłam głównym autorem (primary author, PA) omawianej publikacji, odpowiadając za całość prac badawczych – od wstępnych analiz aż po finalną wersję artykułu. Wstępna analiza danych została wykonana w ramach mojej rozprawy doktorskiej. Ze względu na konieczność poprawy kalibracji średniej straty energii na jonizację w danych p+p, całość analiz została przeprowadzona ponownie. Opracowałam ponadto pierwszy system poprawek na wydajność detektora na poziomie momentów rozkładów krotności cząstek zidentyfikowanych. Przygotowałam pierwotną wersję manuskryptu oraz wszystkie rysunki. Jako główny autor uczestniczyłam we wszystkich spotkaniach Editorial Board dotyczących tej pracy. Mój wkład w powstanie publikacji szacuję na około 90%.
- [H5] **Mackowiak-Pawłowska, M.**, M. Naskręt i M. Gazdzicki. „Remarks on volume fluctuations in fixed-target heavy-ion experiments”. W: *Nucl. Phys. A* 1014 (2021), s. 122258. [DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2021.122258](https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2021.122258). arXiv: 2102.11186 [hep-ex].
IF=1.558, pkt MEiN=100, cytowania INSPIRE-HEP=4
Byłam głównym autorem przeprowadzonej analizy oraz tekstu publikacji. Wykonałam również wszystkie rysunki prezentujące dane modelowe. Mój wkład w powstanie pracy oceniam na około 85%.
- [H6] Marek Gazdzicki, M. I. Gorenstein i **M. Maćkowiak-Pawłowska**. „Normalization of strongly intensive quantities”. W: *Phys. Rev. C* 88.2 (2013), s. 024907. [DOI: 10.1103/PhysRevC.88.024907](https://doi.org/10.1103/PhysRevC.88.024907). arXiv: 1303.0871 [nucl-th].
IF=0.9, pkt MEiN=70, cytowania INSPIRE-HEP=3

Uczestniczyłam w pracach nad opracowaniem procedury normalizacji, jej testowaniem oraz przygotowaniem tekstu publikacji. Mój wkład w powstanie pracy oceniam na około 33%.

- [H7] M. Gazdzicki, M. I. Gorenstein, A. Fronczak, P. Fronczak i **M. Mackowiak-Pawłowska**. „Steady state of isolated systems versus microcanonical ensemble in cell model of particle creation and annihilation”. W: *Int. J. Mod. Phys. E* 26.12 (2017), s. 1750085. [DOI: 10.1142/S0218301317500859](#). arXiv: 1704.01878 [nucl-th].

IF=0.9, pkt MEiN=70, cytowania INSPIRE-HEP=3

Uczestniczyłam w pracach nad opracowaniem metody, przeprowadzeniu symulacji oraz przygotowaniu tekstu publikacji. Mój wkład w powstanie pracy oceniam na około 20%.

- [H8] **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE Collaboration). „NA61/SHINE results on fluctuations and correlations in p + p and Be + Be interactions at CERN SPS energies”. W: *Nucl. Phys. A* 956 (2016). Red. Y. Akiba, S. Esumi, K. Fukushima, H. Hamagaki, T. Hatsuda, T. Hirano i K. Shigaki, s. 344–347. [DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2016.03.036](#). arXiv: 1602.03682 [nucl-ex].

IF=1.9, pkt MEiN=25, cytowania INSPIRE-HEP=2

W artykule podsumowującym wyniki kolaboracji NA61/SHINE przeprowadziłam analizę i dyskusję wyników udostępnionych lub opublikowanych przez eksperymenty NA61/SHINE oraz NA49. Koncepcja artykułu, jego struktura oraz całość tekstu manuskryptu zostały opracowane przeze mnie. Ponadto uczestniczyłam w zbieraniu danych eksperymentu NA61/SHINE omawianych w tej pracy oraz przygotowałam dane modelowe UrQMD dla zderzeń p+p i Pb+Pb. Mój wkład w powstanie artykułu oceniam na 100%.

- [H9] **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE Collaboration). „NA61/SHINE results on fluctuations and correlations at CERN SPS energies”. W: *Nucl. Phys. A* 1005 (2021). Red. Feng Liu, Enke Wang, Xin-Nian Wang, Nu Xu i Ben-Wei Zhang, s. 121753. [DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2020.121753](#). arXiv: 2002.04847 [nucl-ex].

IF=1.558, pkt MEiN=100, cytowania INSPIRE-HEP=21

W artykule podsumowującym wyniki kolaboracji NA61/SHINE przeprowadziłam analizę i dyskusję wyników udostępnionych lub opublikowanych przez eksperymenty NA61/SHINE w tym wyników moich analiz dotyczących fluktuacji w zderzeniach p+p i Be+Be. Koncepcja artykułu, jego struktura oraz całość tekstu manuskryptu zostały opracowane przeze mnie. Ponadto uczestniczyłam w zbieraniu danych eksperymentu NA61/SHINE omawianych w tej pracy oraz przygotowałam dane modelowe UrQMD dla zderzeń p+p i Pb+Pb. Mój wkład w powstanie artykułu oceniam na 100%.

- [H10] **M. Mackowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE Collaboration). „Study of the phase diagram of strongly interacting matter in the NA61/SHINE experiment”. W: *PoS PANIC2021* (2022), s. 238. [DOI: 10.22323/1.380.0238](#). arXiv: 2112.01877 [nucl-ex].

IF=0.08, pkt MEiN=5, cytowania INSPIRE-HEP=4

W artykule podsumowującym wyniki kolaboracji NA61/SHINE przeprowadziłam analizę i dyskusję wyników udostępnionych lub opublikowanych przez eksperymenty NA61/SHINE w tym wyników moich analiz dotyczących fluktuacji w zderzeniach p+p i Be+Be. Koncepcja artykułu, jego struktura oraz całość tekstu manuskryptu zostały opracowane przeze mnie. Ponadto uczestniczyłam w zbieraniu danych eksperymentu NA61/SHINE omawianych w tej pracy oraz przygotowałam dane modelowe UrQMD dla zderzeń p+p i Pb+Pb. Mój wkład w powstanie artykułu oceniam na 100%.

- [H11] **NA61/SHINE Collaboration**. „Multiplicity and net-electric charge fluctuations in central Ar+Sc interactions at 13A, 19A, 30A, 40A, 75A, and 150A GeV/c beam momenta measured by NA61/SHINE at the CERN SPS”. W: *Eur. Phys. J. C* 85.8 (2025), s. 918. [DOI: 10.1140/epjc/s10052-025-14621-z](#). arXiv: 2503.22484 [nucl-ex].

IF=4.8, pkt MEiN=140, cytowania INSPIRE-HEP=3

W artykule przeprowadziłam niezależną weryfikację uzyskanych wyników fluktuacji krotności. Odpowiadałam za przygotowanie rysunków prezentujących wyniki oraz uczestniczyłam w pracach nad opracowaniem i redakcją tekstu publikacji. Mój wkład w powstanie pracy oceniam na około 40%.

II. Aktywność naukowa lub artystyczna

1. Wykaz opublikowanych artykułów w czasopismach naukowych

Artykuły nie powstałe w ramach współpracy eksperymentalnej: [1], materiały konferencyjne: [2–14], artykuły

w ramach współpracy NA61/SHINE: [16-57], artykuły w ramach współpracy NA49: [58-69].

- [1] M. Gazdzicki, K. Grebieszko, M. Maćkowiak i S. Mrówczyński. „Identity method to study chemical fluctuations in relativistic heavy-ion collisions”. W: *Phys. Rev. C* 83 (2011), s. 054907. [DOI: 10.1103/PhysRevC.83.054907](#). arXiv: 1103.2887 [nucl-th].
- [2] M. Maćkowiak-Pawłowska. „Latest results from the NA61/SHINE beam energy scan with p+p and Be+Be collisions”. W: *Conference on recent developments in high energy physics and cosmology*. T. EPS-HEP2015. 2015. [DOI: 10.22323/1.234.0205](#). arXiv: 1510.08688 [nucl-ex].
- [3] M. Maćkowiak-Pawłowska. „News on fluctuations and correlations from the NA61/SHINE experiment”. W: *EPJ Web Conf.* 206 (2019). Red. A. Yang, W. Y. Wang, S. C. C. Ng, A. H. Chan, C. H. Oh i K. K. Phua, s. 03003. [DOI: 10.1051/epjconf/201920603003](#).
- [4] M. Maćkowiak-Pawłowska. „Recent results from NA61/SHINE”. W: *Acta Phys. Polon. Supp.* 10.4 (2017), s. 1183–1189. [DOI: 10.5506/APhysPolBSupp.10.1183](#). arXiv: 1707.04735 [nucl-ex].
- [5] M. Maćkowiak-Pawłowska. „Higher order moments of net-charge and multiplicity distributions in $p + p$ interactions at SPS energies from NA61/SHINE”. W: *Acta Phys. Polon. Supp.* 10 (2017), s. 657–661. [DOI: 10.5506/APhysPolBSupp.10.657](#). arXiv: 1610.03838 [nucl-ex].
- [6] M. Maćkowiak-Pawłowska. „Fluctuations and correlations in nucleus-nucleus collisions observed by NA61/SHINE at CERN SPS energies”. W: *PoS CPOD2021* (2022), s. 028. [DOI: 10.22323/1.400.0028](#). arXiv: 2111.05042 [nucl-ex].
- [7] M. Maćkowiak. „NA61/SHINE ion program”. W: *J. Phys. Conf. Ser.* 270 (2011). Red. Markus Bleicher, Helen Caines, Manuel Calderon de la Barca Sanchez, Alessandro De Falco, Rainer Fries, Raphael Granier de Cassagnac, Boris Hippolyte, Andre Mischke, Marzia Nardi i Carlos A. Salgado, s. 012048. [DOI: 10.1088/1742-6596/270/1/012048](#). arXiv: 1009.1035 [nucl-ex].
- [8] M. Maćkowiak. „Identity method - a new tool for studying chemical fluctuations”. W: *Phys. Atom. Nucl.* 75 (2012), s. 651–653. [DOI: 10.1134/S1063778812060245](#). arXiv: 1102.4171 [nucl-ex].
- [9] M. Maćkowiak-Pawłowska. „Energy Dependence of Identified Hadron Fluctuations in $p + p$ Interactions from NA61/SHINE”. W: *PoS CPOD2013* (2013), s. 048. [DOI: 10.22323/1.185.0048](#).
- [10] Maja Maćkowiak-Pawłowska. „Recent results from NA61/SHINE and comparison to NA49”. W: *42nd International Symposium on Multiparticle Dynamics*. T. 6. 2013, s. 419–427. [DOI: 10.5506/APhysPolBSupp.6.419](#). arXiv: 1212.6880 [nucl-ex].
- [11] Viktor Begun i M. Maćkowiak-Pawłowska. „Multi moment cancellation of participant fluctuations”. W: *PoS CPOD2017* (2018), s. 065. [DOI: 10.22323/1.311.0065](#). arXiv: 1712.05805 [nucl-th].
- [12] M. Maćkowiak-Pawłowska i A. Wilczek. „Multiplicity fluctuations of identified hadrons in p+p interactions at SPS energies”. W: *J. Phys. Conf. Ser.* 509 (2014). Red. David Evans, Simon Hands, Roman Lietava, Rosa Romita i Orlando Villalobos Baillie, s. 012044. [DOI: 10.1088/1742-6596/509/1/012044](#). arXiv: 1402.0707 [hep-ex].
- [13] Maja Maćkowiak-Pawłowska. „New results from fluctuation analysis in NA49 at the CERN SPS”. W: *Central Eur. J. Phys.* 10 (2012), s. 1285–1288. [DOI: 10.2478/s11534-012-0112-1](#). arXiv: 1201.5237 [nucl-ex].
- [14] NA61/SHINE Collaboration. „Measurements of hadron production in 90 GeV/c proton-carbon interactions”. W: *Phys. Rev. D* 112.1 (2025), s. 012011. [DOI: 10.1103/42nk-jbvm](#). arXiv: 2410.23098 [hep-ex].
- [15] NA61/SHINE Collaboration. „Measurement of the mass-changing, charge-changing, and production cross sections of C11, B11, and B10 nuclei in C12+p interactions at 13.5 GeV/c per nucleon”. W: *Phys. Rev. C* 111.5 (2025), s. 054606. [DOI: 10.1103/PhysRevC.111.054606](#). arXiv: 2410.18273 [nucl-ex].

- [16] NA61/SHINE Collaboration. „Evidence of isospin-symmetry violation in high-energy collisions of atomic nuclei”. W: *Nature Commun.* 16.1 (2025), s. 2849. [DOI: 10.1038/s41467-025-57234-6](#). arXiv: 2312.06572 [nucl-ex].
- [17] NA61/SHINE Collaboration. „ K_S^0 meson production in inelastic p+p interactions at 31, 40 and 80 GeV/c beam momentum measured by NA61/SHINE at the CERN SPS”. W: *Eur. Phys. J. C* 84.8 (2024), s. 820. [DOI: 10.1140/epjc/s10052-024-13056-2](#). arXiv: 2402.17025 [hep-ex].
- [18] NA61/SHINE Collaboration. „Search for a critical point of strongly-interacting matter in central $^{40}\text{Ar} + ^{45}\text{Sc}$ collisions at 13 A–75 A GeV/c beam momentum”. W: *Eur. Phys. J. C* 84.7 (2024), s. 741. [DOI: 10.1140/epjc/s10052-024-13012-0](#). arXiv: 2401.03445 [nucl-ex].
- [19] NA61/SHINE Collaboration. „Measurements of $\pi^\pm$, $K^\pm$, p and $\bar{p}$ spectra in $^{40}\text{Ar} + ^{45}\text{Sc}$ collisions at 13A to 150A GeV/c”. W: *Eur. Phys. J. C* 84.4 (2024), s. 416. [DOI: 10.1140/epjc/s10052-024-12602-2](#). arXiv: 2308.16683 [nucl-ex].
- [20] NA61/SHINE Collaboration. „Measurements of π^+ , π^- , p, $\bar{p}$, K^+ and K^- production in 120 GeV/c p + C interactions”. W: *Phys. Rev. D* 108 (2023), s. 072013. [DOI: 10.1103/PhysRevD.108.072013](#). arXiv: 2306.02961 [hep-ex].
- [21] NA61/SHINE Collaboration. „Search for the critical point of strongly-interacting matter in $^{40}\text{Ar} + ^{45}\text{Sc}$ collisions at 150A GeV/c using scaled factorial moments of protons”. W: *Eur. Phys. J. C* 83.9 (2023), s. 881. [DOI: 10.1140/epjc/s10052-023-11942-9](#). arXiv: 2305.07557 [nucl-ex].
- [22] NA61/SHINE Collaboration. „Two-pion femtoscopic correlations in Be+Be collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 16.84$ GeV measured by the NA61/SHINE at CERN”. W: *Eur. Phys. J. C* 83.10 (2023), s. 919. [DOI: 10.1140/epjc/s10052-023-11997-8](#). arXiv: 2302.04593 [nucl-ex].
- [23] NA61/SHINE Collaboration. „Measurements of K_S^0 , Λ , and Λ^- production in 120 GeV/c p+C interactions”. W: *Phys. Rev. D* 107.7 (2023), s. 072004. [DOI: 10.1103/PhysRevD.107.072004](#). arXiv: 2211.00183 [hep-ex].
- [24] NA61/SHINE Collaboration. „Measurement of hadron production in π -C interactions at 158 and 350 GeV/c with NA61/SHINE at the CERN SPS”. W: *Phys. Rev. D* 107.6 (2023), s. 062004. [DOI: 10.1103/PhysRevD.107.062004](#). arXiv: 2209.10561 [nucl-ex].
- [25] NA61/SHINE Collaboration. „ $K^*(892)^0$ meson production in inelastic p+p interactions at 40 and 80 GeV/c beam momenta measured by NA61/SHINE at the CERN SPS”. W: *Eur. Phys. J. C* 82.4 (2022), s. 322. [DOI: 10.1140/epjc/s10052-022-10281-5](#). arXiv: 2112.09506 [nucl-ex].
- [26] NA61/SHINE Collaboration. „ K_S^0 meson production in inelastic p+p interactions at 158 GeV/c beam momentum measured by NA61/SHINE at the CERN SPS”. W: *Eur. Phys. J. C* 82.1 (2022), s. 96. [DOI: 10.1140/epjc/s10052-021-09976-y](#). arXiv: 2106.07535 [hep-ex].
- [27] NA61/SHINE Collaboration. „Measurements of $\Xi(1530)^0$ and $\Xi(1530)^-$ production in proton–proton interactions at $\sqrt{s_{NN}} = 17.3$ GeV in the NA61/SHINE experiment”. W: *Eur. Phys. J. C* 81.10 (2021), s. 911. [DOI: 10.1140/epjc/s10052-021-09631-6](#). arXiv: 2105.09144 [nucl-ex].
- [28] NA61/SHINE Collaboration. „Spectra and mean multiplicities of π^- in central $^{40}\text{Ar} + ^{45}\text{Sc}$ collisions at 13A, 19A, 30A, 40A, 75A and 150A GeV/c beam momenta measured by the NA61/SHINE spectrometer at the CERN SPS”. W: *Eur. Phys. J. C* 81.5 (2021), s. 397. [DOI: 10.1140/epjc/s10052-021-09135-3](#). arXiv: 2101.08494 [hep-ex].
- [29] NA61/SHINE Collaboration. „Measurement of the production cross section of 31 GeV/c protons on carbon via beam attenuation in a 90-cm-long target”. W: *Phys. Rev. D* 103.1 (2021), s. 012006. [DOI: 10.1103/PhysRevD.103.012006](#). arXiv: 2010.11819 [hep-ex].
- [30] NA61/SHINE Collaboration. „Measurements of $\pi^\pm$, $K^\pm$, p and $\bar{p}$ spectra in $^7\text{Be} + ^9\text{Be}$ collisions at beam momenta from 19A to 150A GeV/c with the NA61/SHINE spectrometer at the CERN SPS”. W:

- Eur. Phys. J. C* 81.1 (2021). [Erratum: *Eur.Phys.J.C* 83, 90 (2023)], s. 73. [DOI](#): 10.1140/epjc/s10052-020-08733-x. arXiv: 2010.01864 [hep-ex].
- [31] NA61/SHINE Collaboration. „Measurements of π^- production in $^7\text{Be}+^9\text{Be}$ collisions at beam momenta from 19A to 150A GeV/c in the NA61/SHINE experiment at the CERN SPS”. W: *Eur. Phys. J. C* 80.10 (2020). [Erratum: *Eur.Phys.J.C* 81, 144 (2021)], s. 961. [DOI](#): 10.1140/epjc/s10052-020-08514-6. arXiv: 2008.06277 [nucl-ex].
 - [32] NA61/SHINE Collaboration. „Measurements of Ξ^- and Ξ^+ production in proton-proton interactions at $\sqrt{s_{NN}} = 17.3$ GeV in the NA61/SHINE experiment”. W: *Eur. Phys. J. C* 80.9 (2020). [Erratum: *Eur.Phys.J.C* 82, 174 (2022)], s. 833. [DOI](#): 10.1140/epjc/s10052-020-8381-0. arXiv: 2006.02062 [nucl-ex].
 - [33] NA61/SHINE Collaboration. „Two-particle correlations in azimuthal angle and pseudorapidity in central $^7\text{Be}+^9\text{Be}$ collisions at the CERN Super Proton Synchrotron”. W: *Eur. Phys. J. C* 80.12 (2020), s. 1151. [DOI](#): 10.1140/epjc/s10052-020-08675-4. arXiv: 2006.02153 [nucl-ex].
 - [34] NA61/SHINE Collaboration. „ $K^*(892)^0$ meson production in inelastic p+p interactions at 158 GeV/c beam momentum measured by NA61/SHINE at the CERN SPS”. W: *Eur. Phys. J. C* 80.5 (2020), s. 460. [DOI](#): 10.1140/epjc/s10052-020-7955-1. arXiv: 2001.05370 [nucl-ex].
 - [35] NA61/SHINE Collaboration. „Search for an Exotic $S = -2, Q = -2$ baryon resonance in proton-proton interactions at $\sqrt{s_{NN}} = 17.3$ GeV”. W: *Phys. Rev. D* 101.5 (2020), s. 051101. [DOI](#): 10.1103/PhysRevD.101.051101. arXiv: 1912.12198 [hep-ex].
 - [36] NA61/SHINE Collaboration. „Proton-Proton Interactions and Onset of Deconfinement”. W: *Phys. Rev. C* 102.1 (2020), s. 011901. [DOI](#): 10.1103/PhysRevC.102.011901. arXiv: 1912.10871 [hep-ex].
 - [37] NA61/SHINE Collaboration. „Measurements of hadron production in $\pi^+ + \text{C}$ and $\pi^+ + \text{Be}$ interactions at 60 GeV/c”. W: *Phys. Rev. D* 100.11 (2019), s. 112004. [DOI](#): 10.1103/PhysRevD.100.112004. arXiv: 1909.06294 [hep-ex].
 - [38] NA61/SHINE Collaboration. „Measurements of production and inelastic cross sections for p+C, p+Be, and p+Al at 60 GeV/c and p+C and p+Be at 120 GeV/c”. W: *Phys. Rev. D* 100.11 (2019), s. 112001. [DOI](#): 10.1103/PhysRevD.100.112001. arXiv: 1909.03351 [hep-ex].
 - [39] NA61/SHINE Collaboration. „Measurement of ϕ meson production in $p + p$ interactions at 40, 80 and 158 GeV/c with the NA61/SHINE spectrometer at the CERN SPS”. W: *Eur. Phys. J. C* 80.3 (2020), s. 199. [DOI](#): 10.1140/epjc/s10052-020-7675-6. arXiv: 1908.04601 [nucl-ex].
 - [40] NA61/SHINE Collaboration. „Measurements of $\pi^\pm$, $K^\pm$ and proton double differential yields from the surface of the T2K replica target for incoming 31 GeV/c protons with the NA61/SHINE spectrometer at the CERN SPS”. W: *Eur. Phys. J. C* 79.2 (2019), s. 100. [DOI](#): 10.1140/epjc/s10052-019-6583-0. arXiv: 1808.04927 [hep-ex].
 - [41] NA61/SHINE Collaboration. „Measurements of total production cross sections for $\pi^+ + \text{C}$, $\pi^+ + \text{Al}$, $K^+ + \text{C}$, and $K^+ + \text{Al}$ at 60 GeV/c and $\pi^+ + \text{C}$ and $\pi^+ + \text{Al}$ at 31 GeV/c”. W: *Phys. Rev. D* 98.5 (2018), s. 052001. [DOI](#): 10.1103/PhysRevD.98.052001. arXiv: 1805.04546 [hep-ex].
 - [42] NA61/SHINE Collaboration. „Measurement of meson resonance production in $\pi^- + \text{C}$ interactions at SPS energies”. W: *Eur. Phys. J. C* 77.9 (2017), s. 626. [DOI](#): 10.1140/epjc/s10052-017-5184-z. arXiv: 1705.08206 [nucl-ex].
 - [43] NA61/SHINE Collaboration. „Measurements of $\pi^\pm$, $K^\pm$, p and $\bar{p}$ spectra in proton-proton interactions at 20, 31, 40, 80 and 158 GeV/c with the NA61/SHINE spectrometer at the CERN SPS”. W: *Eur. Phys. J. C* 77.10 (2017), s. 671. [DOI](#): 10.1140/epjc/s10052-017-5260-4. arXiv: 1705.02467 [nucl-ex].

- [44] NA61/SHINE Collaboration. „Two-particle correlations in azimuthal angle and pseudorapidity in inelastic p + p interactions at the CERN Super Proton Synchrotron”. W: *Eur. Phys. J. C* 77.2 (2017), s. 59. [DOI: 10.1140/epjc/s10052-017-4599-x](#). arXiv: 1610.00482 [nucl-ex].
- [45] NA61/SHINE Collaboration. „Measurements of $\pi^\pm$ differential yields from the surface of the T2K replica target for incoming 31 GeV/c protons with the NA61/SHINE spectrometer at the CERN SPS”. W: *Eur. Phys. J. C* 76.11 (2016), s. 617. [DOI: 10.1140/epjc/s10052-016-4440-y](#). arXiv: 1603.06774 [hep-ex].
- [46] NA61/SHINE Collaboration. „Production of Λ -hyperons in inelastic p+p interactions at 158 GeV/c”. W: *Eur. Phys. J. C* 76.4 (2016), s. 198. [DOI: 10.1140/epjc/s10052-016-4003-2](#). arXiv: 1510.03720 [hep-ex].
- [47] NA61/SHINE Collaboration. „Measurements of $\pi^\pm$, $K^\pm$, K_S^0 , Λ and proton production in proton-carbon interactions at 31 GeV/c with the NA61/SHINE spectrometer at the CERN SPS”. W: *Eur. Phys. J. C* 76.2 (2016), s. 84. [DOI: 10.1140/epjc/s10052-016-3898-y](#). arXiv: 1510.02703 [hep-ex].
- [48] NA61/SHINE Collaboration. „Multiplicity and transverse momentum fluctuations in inelastic proton-proton interactions at the CERN Super Proton Synchrotron”. W: *Eur. Phys. J. C* 76.11 (2016), s. 635. [DOI: 10.1140/epjc/s10052-016-4450-9](#). arXiv: 1510.00163 [hep-ex].
- [49] NA61/SHINE Collaboration. „NA61/SHINE facility at the CERN SPS: beams and detector system”. W: *JINST* 9 (2014), P06005. [DOI: 10.1088/1748-0221/9/06/P06005](#). arXiv: 1401.4699 [physics.ins-det].
- [50] NA61/SHINE Collaboration. „Measurement of negatively charged pion spectra in inelastic p+p interactions at $p_{lab} = 20, 31, 40, 80$ and 158 GeV/c”. W: *Eur. Phys. J. C* 74.3 (2014), s. 2794. [DOI: 10.1140/epjc/s10052-014-2794-6](#). arXiv: 1310.2417 [hep-ex].
- [51] NA61/SHINE Collaboration. „Measurements of production properties of K_S^0 mesons and Λ hyperons in proton-carbon interactions at 31 GeV/c”. W: *Phys. Rev. C* 89.2 (2014), s. 025205. [DOI: 10.1103/PhysRevC.89.025205](#). arXiv: 1309.1997 [physics.acc-ph].
- [52] NA61/SHINE Collaboration. „Pion emission from the T2K replica target: method, results and application”. W: *Nucl. Instrum. Meth. A* 701 (2013), s. 99–114. [DOI: 10.1016/j.nima.2012.10.079](#). arXiv: 1207.2114 [hep-ex].
- [53] NA49 Collaboration. „Energy dependence of identified hadron spectra and event-by-event fluctuations in p+p interactions from NA61/SHINE at the CERN SPS”. W: *PoS ConfinementX* (2012). Red. Matthias Berwein, Nora Brambilla i Stephan Paul, s. 207. [DOI: 10.22323/1.171.0207](#). arXiv: 1301.3360 [nucl-ex].
- [54] NA61/SHINE Collaboration. „Measurement of Production Properties of Positively Charged Kaons in Proton-Carbon Interactions at 31 GeV/c”. W: *Phys. Rev. C* 85 (2012), s. 035210. [DOI: 10.1103/PhysRevC.85.035210](#). arXiv: 1112.0150 [hep-ex].
- [55] NA61/SHINE Collaboration. „Measurements of Cross Sections and Charged Pion Spectra in Proton-Carbon Interactions at 31 GeV/c”. W: *Phys. Rev. C* 84 (2011), s. 034604. [DOI: 10.1103/PhysRevC.84.034604](#). arXiv: 1102.0983 [hep-ex].
- [56] NA49 Collaboration. „Antideuteron and deuteron production in mid-central Pb+Pb collisions at 158A GeV”. W: *Phys. Rev. C* 85 (2012), s. 044913. [DOI: 10.1103/PhysRevC.85.044913](#). arXiv: 1111.2588 [nucl-ex].
- [57] NA49 Collaboration. „Production of deuterium, tritium, and He3 in central Pb + Pb collisions at 20A,30A,40A,80A, and 158A GeV at the CERN Super Proton Synchrotron”. W: *Phys. Rev. C* 94.4 (2016), s. 044906. [DOI: 10.1103/PhysRevC.94.044906](#). arXiv: 1606.04234 [nucl-ex].

- [58] NA49 Collaboration. „Measurement of event-by-event transverse momentum and multiplicity fluctuations using strongly intensive measures $\Delta[P_T, N]$ and $\Sigma[P_T, N]$ in nucleus-nucleus collisions at the CERN Super Proton Synchrotron”. W: *Phys. Rev. C* 92.4 (2015), s. 044905. [DOI](#): 10.1103/PhysRevC.92.044905. arXiv: 1509.04633 [nucl-ex].
- [59] NA49 Collaboration. „Onset of deconfinement and search for the critical point of strongly interacting matter at CERN SPS energies”. W: *PoS ICHEP2012* (2013). Red. Antonio Limosani, s. 422. [DOI](#): 10.22323/1.174.0422. arXiv: 1211.6541 [nucl-ex].
- [60] NA49 Collaboration. „Critical fluctuations of the proton density in A+A collisions at 158A GeV”. W: *Eur. Phys. J. C* 75.12 (2015), s. 587. [DOI](#): 10.1140/epjc/s10052-015-3738-5. arXiv: 1208.5292 [nucl-ex].
- [61] NA49 Collaboration. „Phase-space dependence of particle-ratio fluctuations in Pb + Pb collisions from 20 A to 158 A GeV beam energy”. W: *Phys. Rev. C* 89.5 (2014), s. 054902. [DOI](#): 10.1103/PhysRevC.89.054902. arXiv: 1310.3428 [nucl-ex].
- [62] NA49 Collaboration. „System-size dependence of particle-ratio fluctuations in Pb + Pb collisions at 158A GeV”. W: *Phys. Rev. C* 87.2 (2013), s. 024902. [DOI](#): 10.1103/PhysRevC.87.024902. arXiv: 1204.2130 [nucl-ex].
- [63] NA49 Collaboration. „Centrality dependence of proton and antiproton spectra in Pb+Pb collisions at 40A GeV and 158A GeV measured at the CERN SPS”. W: *Phys. Rev. C* 83 (2011), s. 014901. [DOI](#): 10.1103/PhysRevC.83.014901. arXiv: 1009.1747 [nucl-ex].
- [64] NA49 Collaboration. „ $K^*(892)^0$ and $\bar{K}^*(892)^0$ production in central Pb+Pb, Si+Si, C+C and inelastic p+p collisions at 158A~GeV”. W: *Phys. Rev. C* 84 (2011), s. 064909. [DOI](#): 10.1103/PhysRevC.84.064909. arXiv: 1105.3109 [nucl-ex].
- [65] NA49 Collaboration. „System-size and centrality dependence of charged kaon and pion production in nucleus-nucleus collisions at 40A GeV and 158A GeV beam energy”. W: *Phys. Rev. C* 86 (2012), s. 054903. [DOI](#): 10.1103/PhysRevC.86.054903. arXiv: 1207.0348 [nucl-ex].
- [66] NA49 Collaboration. „Energy dependence of kaon-to-proton ratio fluctuations in central Pb+Pb collisions from $\sqrt{s_{NN}} = 6.3$ to 17.3~GeV”. W: *Phys. Rev. C* 83 (2011), s. 061902. [DOI](#): 10.1103/PhysRevC.83.061902. arXiv: 1101.3250 [nucl-ex].
- [67] NA49 Collaboration. „Proton - Lambda Correlations in Central Pb+Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 17.3$ GeV”. W: *Phys. Rev. C* 83 (2011), s. 054906. [DOI](#): 10.1103/PhysRevC.83.054906. arXiv: 1103.3395 [nucl-ex].
- [68] NA49 Collaboration. „Evidence for the onset of deconfinement and quest for the critical point by NA49 at the CERN SPS”. W: *Phys. Atom. Nucl.* 75 (2012), s. 556–566. [DOI](#): 10.1134/S1063778812050158.
- [69] NA49 Collaboration. „Search for the critical point of strongly interacting matter at the CERN SPS”. W: *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* 219–220 (2011). Red. Stanislav Dubnicka, Anna Zuzana Dubnickova i Erik Bartos, s. 102–110. [DOI](#): 10.1016/j.nuclphysbps.2011.10.078.

Pozostała aktywność naukowa

2. Wystąpienia na krajowych lub międzynarodowych konferencjach naukowych lub artystycznych, z wyszczególnieniem przedstawionych wykładów na zaproszenie i wykładów plenarnych

Wystąpienia zaproszone

Po uzyskaniu stopnia doktora

- 1 M. Maćkowiak-Pawłowska, NA61/SHINE light-ion physics program, konferencja Light ion collisions at LHC, CERN, 2024

Pozostała aktywność naukowa (kontynuacja)

- 2 **M. Maćkowiak-Pawłowska**, *Requests from the North Area experiments for ion beams*, konferencja Injectors and Experiments Facilities Workshop, CERN, 2021
- 3 **M. Maćkowiak-Pawłowska**, *Identity and Particle-Set methods to study multiplicity fluctuations at SPS energies*, NICA Days, Warszawa, 2021
- 4 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE), *News on fluctuations and correlations from the NA61/SHINE experiment*, konferencja 48th International Symposium on Multi-particle Dynamics, Singapur, 2018

Wystąpienia, na których reprezentowałam zaproszona kolaborację NA49 i/lub NA61/SHINE

- 1 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE), *NA61/SHINE future plans*, konferencja Town meeting: heavy ion and QGP physics at CERN, CERN, 2025
- 2 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE), *Ion beams in the North Area: NA61++*, konferencja PBC Annual Workshop, CERN, 2024
- 3 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE), *Status of the proposals: NA61++*, konferencja PBC Annual Workshop, CERN, 2022
- 4 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE), *Recent results from NA61/SHINE*, Excited QCD, Portugal, 2017

Przed uzyskaniem stopnia doktora

- 1 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE), *New results from fluctuation analysis in NA49 at the CERN SPS*, konferencja 7th International Workshop on Critical Point and Onset of Deconfinement, Chiny, 2011

Wystąpienia zgłoszone

Po uzyskaniu stopnia doktora

- 1 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE), *NA61/SHINE results on multiplicity and net-charge fluctuations at CERN SPS energies*, the XXXI International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions - Quark Matter 2025, Frankfurt, Niemcy, 2025
- 2 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE), 19th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD 2023), Portugal, 2023
- 3 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE), *Fluctuations and correlations in nucleus-nucleus collisions observed by NA61/SHINE at CERN SPS energies*, Critical Point and Onset of Deconfinement (CPOD2021), online, 2021
- 4 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE), *Study of the phase diagram of strongly interacting matter in the NA61/SHINE experiment*, Particles and Nuclei International Conference (PANIC 2021), online, Portugal, 2021
- 5 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE), *NA61/SHINE results on fluctuations and correlations at CERN SPS energies*, The XXVIIIth International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions - Quark Matter 2019, Chiny, 2019
- 6 V. Begun, **M. Maćkowiak-Pawłowska**, *Multimoment-moment cancelation of participant fluctuations*, 11th International Workshop on Critical Point and Onset of Deconfinement (CPOD 2017), US, 2017

Pozostała aktywność naukowa (kontynuacja)

- 7 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE), *Recent results on fluctuations from the NA61/SHINE strong*, XII Polish Workshop on Relativistic Heavy-Ion Collisions, Kielce, 2016
- 8 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE), *Higher order moments of net-charge and multiplicity distribution in p+p interactions at SPS*, 10th International Workshop on Critical Point and Onset of Deconfinement (CPOD 2016), Wrocław, 2016
- 9 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE), *NA61/SHINE results on fluctuations and correlations in p+p and Be+Be interactions at CERN SPS energies*, The XXV International Conference On Ultrarelativistic Heavy-Ion Collisions, Japonia, 2015
- 10 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE), *Latest results from the NA61/SHINE beam energy scan with p+p and Be+Be collisions*, ESP-HEP, Austria
- 11 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE), *Fluctuations and correlations from the energy scan in p+p and Be+Be interactions at the SPS energies*, 11-th Polish Workshop on Relativistic Heavy-Ion Collisions, Warszawa, 2015

Przed uzyskaniem stopnia doktora

- 1 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE), *Energy dependence of identified hadron fluctuations in p+p interactions at the CERN SPS*, 8th International Workshop on Critical Point and Onset of Deconfinement (CPOD 2013), USA, 2013
- 2 **Maja Maćkowiak-Pawłowska**, Andrzej Wilczek (for the NA61/SHINE), *Multiplicity fluctuations of identified hadrons in p+p interactions at SPS energies*, 14th International Conference on Strangeness in Quark Matter (SQM2013) (SQM 2013), UK, 2013
- 3 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for the NA61/SHINE), *Energy dependence of chemical fluctuations*, Workshop on Particle Correlations and Fluctuations (WPCF2012), Niemcy, 2012
- 4 **M. Maćkowiak-Pawłowska** (for NA61/SHINE and NA49), 42nd International Symposium on Multiparticle Dynamics, Kielce, 2012

Other presentations

- 1 **M. Maćkowiak-Pawłowska**, *News from the NA61/SHINE strong-interactions program*, seminarium w Zakładzie Fizyki Jądrowej, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, 2021

Pozostała aktywność naukowa (kontynuacja)

3. Udział w komitetach organizacyjnych i naukowych konferencji krajowych lub międzynarodowych, z podaniem pełnionej funkcji

Nazwa	Rola, informacja na temat konferencji...
2024- ..	Członkini International Advisory Committee serii konferencji Workshop on Critical Point and Onset of Deconfinement (CPOD)
2024-2026	Koordynator (wraz z dr Robertą Arnaldi) Lokalnego Komitetu Organizacyjnego konferencji 16th Workshop on Critical Point and Onset of Deconfinement (CPOD), CERN
2024	Członkini Lokalnego Komitetu Organizacyjnego konferencji XVII Polish Workshop on Relativistic Heavy-Ion Collisions https://indico.cern.ch/event/1438306/

4. Uczestnictwo w pracach zespołów badawczych realizujących projekty finansowane w drodze konkursów krajowych lub zagranicznych, z podziałem na projekty zrealizowane i będące w toku realizacji, oraz z uwzględnieniem informacji o pełnionej funkcji w ramach prac zespołów

Projekty, w których pełnię rolę Kierownika Projektu

Po otrzymaniu stopnia doktora

Instytucja	Szczegóły projektu
NCN SONATA	Zbadanie fluktuacji wyższych momentów rozkładów netto-ładunku i krotkości cząstek wyprodukowanych w wysoko energetycznych zderzeniach jądrowych przy energiach akceleratora SPS zebranych przez eksperyment NA61/SHINE nr rej. 2016/21/D/ST2/01983 okres: 6.02.2017 - 21.10.2021 kwota: 197 860 PLN
PW IDUB	Badanie fluktuacji oraz produkcji hadronów w zderzeniach jonów w eksperymencie NA61/SHINE konkurs: IDUB-POB-FWEiTE-1 nr por. 1820/16/Z01/POB6/2020 okres: 1.07.2020 - 31.12.2021 kwota: 252 046 PLN Podtrzymanie i rozwinięcie kluczowej roli grupy PW w kolaboracji NA61/SHINE konkurs: CP POB FWEiTE nr por. CPR-IDUB/151/Z01/POB6/2024 okres: 6.05.2024 - 31.12.2025 kwota: 219 650 PLN

Pozostała aktywność naukowa (kontynuacja)

Granty dziekańskie	Granty dziekańskie Wydziału Fizyki PW dla Młodych Naukowców w latach 2014, 2016, 2018 i 2019 r. 2014: <i>Modelowanie korelacji dwucząstkowych w kącie azymutalnym i pseudo-pośpieszności oraz fluktuacji w krotności i składzie produkowanych cząstek w zderzeniach jądrowych przy energiach akceleratora SPS</i> , kwota: 10 198 PLN 2016: <i>Wpływ rozpadów rezonansów na produkcję i fluktuacje rozkładów dodatnich, ujemnych hadronów i net-ładunku w zderzeniach p+p i Be+Be przy energiach akceleratora SPS</i> , kwota: 9 000 PLN 2018: <i>Wpływ rozmiaru systemu na fluktuacje netto ładunku i krotności w zderzeniach Ar+Sc przy pędzie wiązki 75A GeV</i> , kwota: 4 525 PLN 2019: <i>Przewidywania modelu EPOS fluktuacji krotności cząstek naładowanych i netto ładunku w zderzeniach Ar+Sc przy pędach wiązki 19A, 30A, 40A i 150A GeV/c</i> , kwota: 7 000 PLN
--------------------	--

Uczestnictwo w projektach naukowych

Projekty finansowane ze źródeł zewnętrznych, w których występuję jako Wykonawca

Po uzyskaniu stopnia doktora

Instytucja	Szczegóły projektu
MEiN	<i>Eksperyment NA61/SHINE w CERN</i> projekt realizowany w ramach konsorcjum Hadrony (lider: UJ) nr umowy 2021/WK/10
MNiSW	<i>Eksperyment NA61/SHINE w CERN</i> projekt realizowany w ramach konsorcjum Hadrony (lider: UJ) nr rej. DIR/WK/2016/2017/10-1
NCN HARMONIA	<i>Badanie zderzeń proton-proton, hadron-jądro oraz jądro-jądro przy relatywistycznych energiach w ramach eksperymentu NA61 SHINE przy CERN SPS - II etap</i> projekt przyznany konsorcjum Hadrony (lider: UJ) nr rej. 2015/18/M/ST2/00125

Przed uzyskaniem stopnia doktora

Instytucja	Szczegóły projektu
NCN HARMONIA	<i>Badanie zderzeń proton-proton, hadron-jądro oraz jądro-jądro przy relatywistycznych energiach w ramach eksperymentu NA61 SHINE przy CERN SPS</i> nr rej. 2012/04/M/ST2/00816 projekt przyznany konsorcjum Hadrony (lider: UJ)
German Research Foundation	<i>Experiment NA61/SHINE at the CERN SPS: Search for the Critical Point and Study of the Onset of Deconfinement</i> kierownik projektu: prof. Marek Gazdzicki (IKF Goethe University)

5. Członkostwo w międzynarodowych lub krajowych organizacjach i towarzystwach naukowych wraz z informacją o pełnionych funkcjach

Po uzyskaniu stopnia doktora

Okres	Organizacja, rola, ...
2025 – ..	Współkoordynator grupy Ion Analysis w ramach kolaboracji NA61/SHINE

Pozostała aktywność naukowa (kontynuacja)

2022- ..	Delegat eksperymentu NA61/SHINE do grupy eksploracyjnej Physics Beyond Colliders (PBC) w CERN mającej na celu wykorzystanie pełnego potencjału naukowego kompleksu akceleratorów CERN oraz jego infrastruktury technicznej, a także zgromadzonej tam wiedzy i doświadczenia w dziedzinie fizyki oraz technologii akceleratorów i detektorów. W ramach prac grupy uczestniczyłam w przygotowaniu dwóch raportów: • Alemany Fernández, R., ..., M. Maćkowiak-Pawłowska,.. (PBC Collaboration), Summary Report of the Physics Beyond Colliders Study at CERN. CERN, Geneva, 2025, CERN-PBC-REPORT-2025-003. arXiv:2505.00947. • Alemany Fernández, R., ..., M. Maćkowiak-Pawłowska,.. (PBC Collaboration), Ion beams requirements for the North Area Experiments post-LS3 CERN, Geneva, 2025. CERN-PBC-REPORT-2025-002.
2022 – 2023	Przewodnicząca Komitetu Redakcyjnego (EB) NA61/SHINE dla publikacji: • Two-pion femtoscopic correlations in Be+Be collisions at $\sqrt{s_{NN}}=16.84$ GeV measured by the NA61/SHINE at CERN, NA61/SHINE Coll., Eur.Phys.J.C 83 (2023) 10, 919 • Search for the critical point of strongly-interacting matter in $^{40}\text{Ar}+^{45}\text{Sc}$ collisions at $150A$ GeV/c using scaled factorial moments of protons, NA61/SHINE Coll., Eur.Phys.J.C 83 (2023) 9, 881 • $K^*(892)^0$ meson production in inelastic $p+p$ interactions at 40 and 80 GeV/c beam momenta measured by NA61/SHINE at the CERN SPS, NA61/SHINE Coll., Eur.Phys.J.C 82 (2022) 4, 322
2018 – 2024	Koordynatorka grupy Monte Carlo w ramach kolaboracji NA61/SHINE
2015 – ..	Zastępczyni szefa grupy (Deputy Team Leader) PW w eksperymencie NA61/SHINE
2009 – ..	Członkini kolaboracji eksperymentu NA61/SHINE za pośrednictwem PW Członkini kolaboracji eksperymentu NA49 za pośrednictwem PW

6. Staże w instytucjach naukowych lub artystycznych, w tym zagranicznych, z podaniem miejsca, terminu, czasu trwania stażu i jego charakteru

Po uzyskaniu stopnia doktora

2016 – ..	Coroczne tygodniowe pobyty w CERN (ze statusem CERN User), Frankfurt (wizytujący naukowiec), czy w Kielcach finansowane z różnych źródeł w tym CERN, NCN, itp. Łączny okres pobyt w różnych ośrodkach naukowych około sześć miesięcy.
2010 – ..	Dwa coroczne tygodniowe spotkania kolaboracji NA49 lub NA61/SHINE w instytucjach goszczących takich jak CERN, Szwajcaria, Université Pierre et Marie Curie, Francja; Inter University Centre Dubrovnik, Chorwacja; Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski.

Przed uzyskaniem stopnia doktora

2011-2014	Studia doktoranckie odbyłam w Institut für Kernphysik, Goethe-Universität Frankfurt w grupie prof. Marka Gaździckiego
-----------	---

III. Współprace z jednostkami z otoczenia społeczno-gospodarczego

Współprace z jednostkami z otoczenia społeczno-gospodarczego

Podejmowałam współpracę z jednostkami edukacyjnymi realizując wydarzenia dydaktyczne lub popularyzujące naukę.

Projekt popularyzujący naukę

Po uzyskaniu stopnia doktora

Projekt	Szczegóły projektu
Masterclass	Koordynuję przygotowanie i przeprowadzenie zajęć Masterclass z radioterapii. Są to jednodniowe zajęcia, organizowane co roku dla licealistów z podstaw oraz planowania radioterapii we współpracy z ośrodkiem GSI w Niemczech. terminy zajęć: 23.11.2021; 23.03.2024; 01.03.2025
Wystawa CERN	Przygotowanie materiałów edukacyjnych dotyczących eksperymentu NA61/SHINE. Wystawa odbyła się w 2024 roku.
Wykład popularnonaukowy	Wykład popularnonaukowy pt. <i>Czym jest materia</i> . 21.01.2016 – prezentacja dla uczniów liceum im. Marszałka Józefa Piłsudskiego w Garwolinie; 12.04.2024 w XIX Liceum Ogólnokształcące w Warszawie, dwukrotnie na Politechnice Warszawskiej dla wizytujących klas
Zajęcia edukacyjne	Zajęcia o strukturze materii przeznaczone dla dzieci wczesnoszkolnych i przedszkolnych prowadzone w latach 2020, 2021 i 2022

Przed uzyskaniem stopnia doktora

Wystawa LHC	Przygotowanie materiałów edukacyjnych dotyczących subdetektora PHOS w eksperymencie ALICE oraz oprowadzanie zwiedzających wystawę. Wystawa odbyła się w 2008 roku.
-------------	--

IV. Dane naukometryczne

Zgodnie z dokumentem *Memorandum on the evaluation of Experimental Particle Physicists, Joint ECFA/HEPP-EPS Document* (<https://cds.cern.ch/record/2014643>) "zwykle wskaźniki, takie jak indeks cytowań, indeks h, ranking na liście autorów itp., nie są przydatne w dziedzinie [fizyki wysokich energii - przyp. M.M.P.] i mogą wprowadzać w błąd. Ewaluatorzy powinni raczej skupić się na najważniejszych publikacjach wskazanych przez kandydatów i szczegółowo przyjrzeć się konkretnej roli, jaką odegrali w każdej z nich". Niemniej zamieszczam dane naukometryczne, zgodnie z zaleceniami Rady Doskonałości Naukowej.

Numery identyfikacyjne naukowca

	https://orcid.org/0000-0003-3954-6329
	https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55155622300
R	http://www.webofscience.com/wos/author/record/1071244

Stan na dzień 5 grudnia 2025 r.

Scopus

Opcja Authors i Secondary Documents	Sumarycznie	Z wykluczeniem autocytowań
	Liczba cytowań	1750
	Indeks Hirscha	22

IV. Dane naukometryczne (kontynuacja)

Web of Science Core Collection

Researchers i Cited Reference

	Sumarycznie	Z wykluczeniem autocytowań
Liczba cytowań	1793	1521
Indeks Hirscha	23	21
JIF sumaryczny	283,096	

Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego

Punktacja MNiSW

Parametr	Wartość
Punktacja ministerialna	5951