

# Spis treści

<b>1</b>	<b>Wstęp</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Zderzenia ciężkich jonów</b>	<b>11</b>
2.1	Fundamentalne składniki materii . . . . .	11
2.2	Wielki Wybuch . . . . .	14
2.3	Badania diagramu fazowego materii jądrowej . . . . .	16
2.4	Zderzenia ciężkich jonów przy relatywistycznych energiach . . . . .	26
2.5	Program Beam Energy Scan . . . . .	32
<b>3</b>	<b>Droga rozwoju femtoskopii korelacyjnej</b>	<b>35</b>
3.1	HBT - prekursor i inspiracja . . . . .	35
3.2	Pierwsze obserwacje . . . . .	36
3.2.1	GGLP - pierwsze obserwacje . . . . .	36
3.2.2	Pierwsze polskie obserwacje: Kraków i Warszawa . . . . .	36
3.3	Podstawy teoretyczne . . . . .	39
3.3.1	Interferometria pionów i statystyka kwantowa bozonów . . . . .	39
3.3.2	Korelacje protonów i oddziaływanie w stanie końcowym . . . . .	41
3.3.3	Kompletny opis teoretyczny korelacji femtoskopowych . . . . .	42
3.4	Pierwsze rezultaty eksperymentalne . . . . .	45
3.4.1	Korelacje $(\pi^0, \pi^0)$ . . . . .	48
3.4.2	Korelacje $(n, n)$ . . . . .	48
3.4.3	Geometryczna interpretacja rezultatów femtoskopowych . . . . .	49
3.5	Nowe oblicza femtoskopii . . . . .	52
3.5.1	Korelacje nukleonów i produkcja deuteronu - „dwie strony tego samego medalu” . . . . .	52
3.5.2	Korelacje cząstek nieidentycznych i asymetria emisji . . . . .	53
3.5.2.1	Interpretacja wyników korelacji cząstek nieidentycznych . . . . .	56
3.5.3	„Imaging of sources” - obrazowanie femtoskopowe . . . . .	58
3.5.4	Dynamika ekspandujących źródeł i „length of homogeneity” . . . . .	59
3.5.4.1	„Length of homogeneity” . . . . .	62

3.5.4.2	„RHIC HBT puzzle” . . . . .	63
3.5.5	Korelacje dwubarionowe . . . . .	68
3.5.5.1	Femtoskopia protonów . . . . .	68
3.5.5.2	Femtoskopia innych systemów barionowych . . . . .	76
3.6	Ku najwyższym energiom . . . . .	79
3.6.1	RHIC . . . . .	79
3.6.2	LHC (CERN) . . . . .	87
3.7	Eksploatacja diagramu fazowego - skan energii i mas . . . . .	95
3.7.1	„Beam Energy Scan” (BES) eksperymentu STAR . . . . .	96
3.7.1.1	Zależność od systemu . . . . .	99
3.7.1.2	Zależność od energii zderzenia . . . . .	101
3.7.1.3	Zależność od centralności zderzenia . . . . .	101
3.7.2	„Fixed target” nowy program eksperymentu STAR . . . . .	103
3.7.3	Mapa mas i energii ( <i>energy-volume mapping</i> ) w eksperymencie NA61 . . . . .	103
3.7.4	Przyszłe eksperymenty: NICA/MPD, FAIR/CBM . . . . .	103
3.8	Femtoskopia w środowisku fizyki i fizyków ciężkich jonów . . . . .	106
<b>4</b>	<b>Formalizm opisu korelacji femtoskopowych</b> . . . . .	<b>111</b>
4.1	Efekty korelacyjne w różnych układach dwucząstkowych . . . . .	111
4.1.1	Pary nieoddziałujących identycznych bozonów, np. $(\pi^+, \pi^+)$ . . . . .	112
4.1.2	Pary nieoddziałujących fermionów identycznych, np. $(p, p)$ lub $(n, n)$ . . . . .	113
4.1.3	Przypadek cząstek spolaryzowanych . . . . .	114
4.1.4	Pary nieidentycznych oddziałujących barionów, np. $(n, p)$ . . . . .	114
4.1.5	Pary oddziałujących cząstek identycznych . . . . .	115
4.1.6	Rola efektów kulombowskich . . . . .	116
4.1.7	Wagi Lednickiego . . . . .	117
4.1.8	Założenia przyjęte w opisie korelacji . . . . .	119
4.1.9	„Bowler-Sinyukov Coulomb correction” . . . . .	119
4.2	Parametryzacja funkcji korelacyjnych . . . . .	122
4.2.1	Parametryzacja Kopyłowa-Podgoreckiego . . . . .	122
4.2.2	Parametryzacja gaussowska . . . . .	123
4.2.3	Układy odniesienia dla opisu korelacji femtoskopowych . . . . .	125
4.2.3.1	LCMS . . . . .	125
4.2.3.2	PRF . . . . .	125
4.2.3.3	CMS . . . . .	126
4.2.3.4	Parametryzacja funkcji emisji źródła oraz promieni femtoskopowych . . . . .	126

4.2.3.5	Interpretacja wartości promieni femtoskopowych . . .	128
4.2.4	Alternatywne sformułowania trójwymiarowej funkcji korelacyjnej . . . . .	129
4.2.4.1	Sferyczne funkcje harmoniczne ( <i>spherical harmonics</i> )	129
4.2.4.2	Analiza zależności azymutalnych (asHBT) . . . . .	131
4.3	Metoda obrazowania źródeł „Imaging of sources” . . . . .	139
<b>5</b>	<b>Eksperymenty zderzeń ciężkich jonów</b>	<b>143</b>
5.1	Relativistic Heavy Ion Collider i eksperyment STAR . . . . .	143
5.1.1	Time Projection Chamber . . . . .	145
5.1.2	Time of Flight . . . . .	148
5.1.3	Heavy Flavor Tracker . . . . .	152
5.1.4	Pozostałe komponenty detektorów . . . . .	154
5.1.5	Niepewności związane z pomiarem wielkości kinematycznych cząstek . . . . .	155
5.2	Large Hadron Collider i eksperyment ALICE . . . . .	156
5.3	Super Proton Synchrotron i eksperyment NA49 i NA61/SHINE . . .	157
5.4	Przyszłość fizyki zderzeń ciężkich jonów: FAIR i NICA . . . . .	158
5.4.1	FAIR . . . . .	158
5.4.2	NICA . . . . .	160
<b>6</b>	<b>Procedury analizy danych doświadczalnych</b>	<b>163</b>
6.1	Eksperymentalna funkcja korelacyjna . . . . .	163
6.2	Kryteria selekcji danych do analizy . . . . .	163
6.2.1	Wybór zderzenia . . . . .	164
6.2.1.1	Lokalizacja zderzenia w detektorze w odniesieniu do jego odległości od osi wiązki . . . . .	164
6.2.1.2	Lokalizacja zderzenia w detektorze w odniesieniu do jego odległości od środka detektora . . . . .	164
6.2.1.3	Przedział centralności zderzenia . . . . .	165
6.2.2	Wybór śladu cząstki . . . . .	168
6.2.2.1	Wykorzystanie informacji z detektora TPC . . . . .	168
6.2.2.2	Wykorzystanie informacji z detektora TOF . . . . .	169
6.2.3	Wybór pary cząstek . . . . .	170
6.3	Korekcje funkcji korelacyjnej . . . . .	173
6.3.1	Tło funkcji korelacyjnej . . . . .	174
6.3.1.1	Normalizacja funkcji korelacyjnej w przypadku braku efektów niefemtoskopowych . . . . .	174

6.3.1.2	Normalizacja funkcji korelacyjnej przy występowania efektów niefemtoskopowych w przypadku cząstek nieidentycznych . . . . .	175
6.3.1.3	Normalizacja w przypadku zderzeń hadronów . . . . .	179
6.3.1.4	Normalizacja w pozostałych przypadkach . . . . .	184
6.3.2	Prawdopodobieństwo poprawnej identyfikacji cząstek . . . . .	187
6.3.3	Rozdzielczość pędu . . . . .	188
6.4	Efekty niefemtoskopowe . . . . .	192
6.4.1	Korelacje wynikające z praw zachowania . . . . .	192
6.4.2	Rola rezonansów w korelacjach femtoskopowych . . . . .	193
6.4.3	Wpływ oddziaływania kulombowskiego pochodzącego od zderzanych jąder . . . . .	197
6.4.4	Dzety . . . . .	200
6.4.5	Korelacje szczytkowe . . . . .	200
6.5	Formalizm korelacji rezydualnych . . . . .	200
<b>7</b>	<b>Femtoskopia w modelach teoretycznych</b>	<b>207</b>
7.1	UrQMD . . . . .	210
7.1.1	Korelacje femtoskopowe układów $\pi - K$ . . . . .	212
7.1.2	Korelacje femtoskopowe protonów i antyprotonów . . . . .	212
7.2	THERMINATOR . . . . .	216
7.2.1	Korelacje femtoskopowe naładowanych kaonów . . . . .	219
7.2.2	Adaptacja generatora w ramach programu BES . . . . .	220
7.3	EPOS . . . . .	227
7.3.1	Rozkłady $p_T$ dla identyfikowalnych hadronów naładowanych . . . . .	230
7.3.2	Femtoskopowe pomiary naładowanych mezonów $\pi$ . . . . .	230
7.3.3	Femtoskopowe korelacje cząstek nieidentycznych ( $\pi - K$ ) . . . . .	234
<b>8</b>	<b>Podsumowanie, wnioski i perspektywy rozwoju</b>	<b>239</b>