

(Физико-технический институт, г. Алматы)

ОЦЕНКА НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ТЯЖЕЛЫХ И ЛЕГКИХ ЯДЕР ПРИ JINR–AGS–SPS ЭНЕРГИЯХ

Аннотация

Актуальность современных проблем релятивистской ядерной физики определяется исключительной важностью задач поиска и анализа процессов фазового перехода вещества из адронного состояния в кварк-глюонную плазму в условиях высоких давлений и температур, создающихся в объеме реакции при соударениях ядер. Множественность заряженных частиц является ключевой наблюдаемой характеристикой свойств возбужденного вещества, рожденного в соударениях ионов высоких энергий. Множественность определяется не только энергией и массами взаимодействующих ядер, но и степенью перекрытия соударяющихся объектов. Поэтому для исследования «истинных» динамических процессов необходимо исключить влияние изменяющейся геометрии столкновения ядер. Оценка начальных условий в отдельных соударениях ядер выполнена на основе методов множественно-фрагментационного корреляционного анализа. Исследования проведены для взаимодействий первичных легких – (C, O, Ne), средних – (Si, S) и тяжелых – (Au, Pb) ионов с тяжелыми – (Ag/Br) и легким – (C/N/O) ядрами эмульсии при JINR–AGS–SPS энергиях. Широкий спектр масс и энергий первичных ионов позволил нам выполнить «двумерное сканирование» начальных условий взаимодействий и оценить ожидаемые тренды.

Ключевые слова: физика ионов высоких энергий, деконфайнмент адронов, ядро-ядерные взаимодействия, JINR–AGS–SPS энергии, начальные условия, множественно-фрагментационный корреляционный анализ.

Кілт сөздер: жоғары энергиялы иондардың физикасы, адрондардың деконфайнменті, ядро-ядролық әрекеттестік, JINR–AGS–SPS энергиялар, бастапқы шарт, жиынды-фрагментациялы корреляциялық талдау.

Keywords: high energy ions physics, hadron deconfinement, nucleus-nucleus collisions, JINR–AGS–SPS energies, initial conditions, multiplicity-fragmentation correlation analysis.

Введение. Международные эксперименты 2001–2005 гг. по физике ионов высоких энергий, выполненные на коллайдере RHIC, привели к выводу о рождении кварк-глюонной плазмы [1] в процессах взаимодействия ядер золота при энергии 200 ГэВ на

нуклон в СЦМ. Дальнейшие исследования проблем конфайнмента-деконфайнмента адронов нацелены на детализацию процессов фазового перехода из адронной в кварк-глюонную фазу. Для этого готовятся новые эксперименты детального «двухмерного сканирования» пара-метров процессов по энергиям и геометрическим условиям столкновений ядер в новом энергетическом интервале. В ОИЯИ (Дубна) для решения таких новых задач во взаимодействиях ионов высоких энергий создается коллайдер NICA [2] – Nuclotron-based Ion Collider fAcility. В Германии, в GSI-центре (Дармштадт), готовится аналогичный эксперимент с фиксированной мишенью FAIR [3] – Facility for Anti-protons and Ion Research. Эксперименты на коллайдере RHIC (Брукхейвен) соответственно переориентированы в проект RHIC II на интервал меньших энергий, с выполнением программы «Beam energy scan» [4]. В ЦЕРНе (Женева) полномасштабное исследование задач «двухмерного сканирования» взаимодействий ионов высоких энергий проводится в эксперименте NA-61 [5], являющимся развитием известного эксперимента NA-49.

Экспериментально процесс фазового перехода может быть зарегистрирован по общему признаку фазо-вых переходов – усилению флуктуаций параметров изучаемой системы вблизи критической точки. Одним из таких параметров является множественность, т.е. обнаружение усиления флуктуаций множественности при сканировании параметров взаимодействий по энергиям и массам сталкивающихся ядер, что должно свидетельствовать о приближении системы к точке фазового перехода. Но во взаимодействиях ядер множественность вторичных частиц определяется не только энергией и массами сталкивающихся ядер, но и степенью перекрытия соударяющихся объектов. При соударениях ядер, близких к центральным, с малыми параметрами удара, будут преобладать процессы высокой множественности. Крайне периферические соударения будут характеризоваться сравнительно низкой множественностью и повышенной вероятностью фрагментационных процессов. Поэтому оценка влияния изменяющейся геометрии в столкновении ядер является необходимым условием исследования «истинных» динамических флуктуаций возбужденных адронных систем. В настоящей работе оценка роли начальных условий в столкновении ядер выполнена на основе анализа корреляций между множественностью и суммой заряженных фрагментов во взаимодействиях тяжелых и легких ионов при JINR–AGS–SPS энергиях.

Первичные данные и варианты анализа. Экспериментальную основу анализа составляет банк данных ФТИ по взаимодействиям тяжелых и легких ионов, сформированный по результатам выполнения междуна-родных экспериментов коллаборацией EMU [6]. Эксперименты выполнялись на нуклотроне Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) при энергиях 3.7 А ГэВ на ускорительном комплексе Alternating Gradient Synchrotron (AGS) Брукхейвенской национальной лаборатории в США при энергиях 10.7 А ГэВ для ионов Au и 14 А ГэВ для ионов Si и на ускорительном комплексе Super Proton Synchrotron (SPS) Европейского центра ядерных исследований (ЦЕРН, Женева), при энергиях 158 А ГэВ для ионов Pb и 200 А ГэВ для ионов S.

Множественно-фрагментационный корреляционный анализ выполнен для следующих групп взаимо-действий первичных ядер с тяжелыми Ag/Br и легкими C/N/O ядрами эмульсии (и тяжелыми Ag/Br ядрами при малом возбуждении, при $N_h < 9$): соударений

тяжелых ионов Au (10.7 А ГэВ) и Pb (158 А ГэВ); соударений средних ионов Si (14 А ГэВ) и S (200 А ГэВ); соударений средних ионов Si и S при энергиях 3.7 А ГэВ; соударений легких ионов C, Ne и O при энергиях 3.7 А ГэВ. Анализ выполнен в переменных нормированных множественностях $N_s/N_s \text{ max}$ и нормированной суммы масс быстрых фрагментов $A/A \text{ max}$ первичного иона. Множественность каждого события нормировалась на максимальное значение множественности $N_s \text{ max}$ в соответствующем эксперименте. Сумма масс быстрых фрагментов в каждом событии нормировалась на величину массы налетающего иона $A \text{ max}$.

Результаты анализа

Основной результат анализа корреляций между множественностью и суммой заряженных фрагментов во взаимодействиях тяжелых и легких ионов при JINR–AGS–SPS энергиях состоит в оценке зависимости флуктуаций нормированной множественности ($N_s/N_s \text{ max}$) и нормированной суммы масс ($A/A \text{ max}$) фрагментов налетающего ядра от начальных условий столкновения ядер. Установлено, что увеличение массы сталкивающихся ядер и рост степени центральности соударений приводит к уменьшению флуктуаций нормированной множественности и нормированной суммы масс фрагментов. В графической форме обзорные результаты корреляционного анализа для всех групп взаимодействий первичных ядер представлены на рисунке. Количественные характеристики анализа сведены в таблице 1. Совокупность двухмерных рас-пределений рисунка 1 наглядно показывает, что наименьшие флуктуации нормированной множественности ($N_s/N_s \text{ max}$) и нормированной суммы масс ($A/A \text{ max}$) фрагментов налетающего ядра имеют место во взаимодействиях самых тяжелых ионов (Au-79 и Pb-82) с тяжелыми (Ag-47/Br-35) ядрами эмульсии при малых параметрах удара. В этом случае разброс данных для нормированной суммы масс ($A/A \text{ max}$) фрагментов вокруг среднего значения составляет 0.20 ± 0.11 и 0.19 ± 0.12 соответственно.

Во взаимодействиях первичных средних и легких ионов с легкими ядрами эмульсии аналогичные величины флуктуаций значительно больше. Флуктуации нормированной суммы масс фрагментов во взаимодействиях ионов S с легкими ядрами эмульсии при энергиях 200 А ГэВ составляют 0.33 ± 0.20 , а во взаимодействиях ионов Si при энергиях 14 А ГэВ – 0.29 ± 0.19 .

Такие же большие флуктуации нормированной суммы масс фрагментов показывают взаимодействия средних и легких ионов при дубненских энергиях 3.7 А ГэВ. В этих соударениях у ядер углерода разброс данных для нормированной суммы масс ($A/A \text{ max}$) фрагментов равен 0.31 ± 0.21 , а у ядер неона – 0.32 ± 0.19 .

Таким образом, при переходе от взаимодействий первичных тяжелых ионов к взаимодействиям средних и легких ионов разброс данных вокруг среднего значения суммы масс ($A/A \text{ max}$) фрагментов значительно – в 1.7–2.0 раза – увеличивается. Более того, полная картина разброса $N_s/N_s \text{ max}$ и $A/A \text{ max}$ распределений во взаимодействиях тяжелых первичных ионов систематически отличаются от аналогичных распределений во взаимодействиях средних и легких первичных ионов.

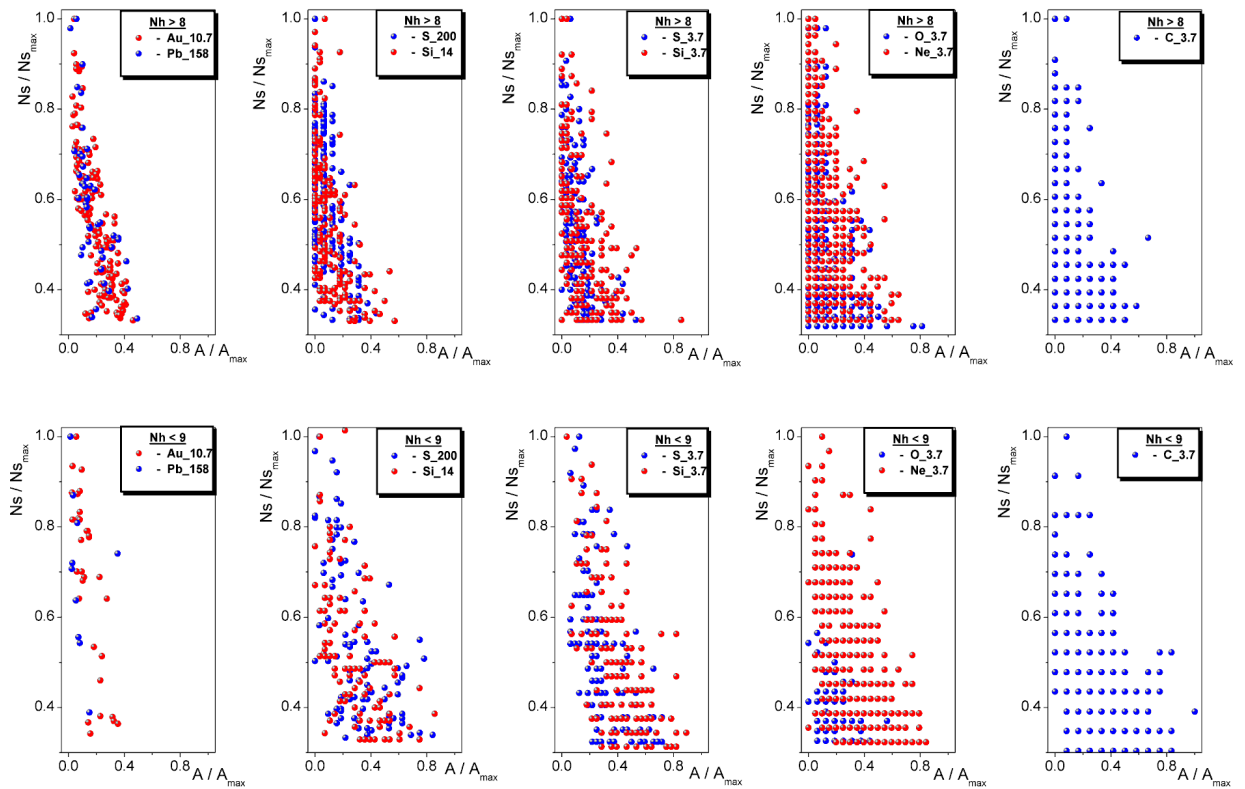


Рисунок 1 – Результаты корреляционного множественно-фрагментационного анализа взаимодействий тяжелых

и легких ионов с тяжелыми и легкими ядрами эмульсии при SPS – AGS – JINR энергиях

Таблица 1

№	Перв. ион	ГЭ В	Число событий		Nh > 8 & Ns > Ns/3			Nh < 9 & Ns > Ns/3		
			все го	анализ	Ns /Nmax	Z/Z _{max}	A/A _{max}	Ns /Nmax	Z/Z _{max}	A/A _{max}
SPS										
1	²⁰⁸ Pb ₈₂	15 8	476	46 / 10	0.58±0.16	0.35±0.20	0.19±0.12	0.70±0.17	0.19±0.16	0.11±0.11
2	³² S ₁₆	20 0	993	202 / 97	0.62±0.15	0.13±0.09	0.08±0.07	0.54±0.17	0.41±0.19	0.33±0.20
AGS										
3	¹⁹⁷ Au ₇₉	10. 7	122 7	157 / 32	0.55±0.15	0.33±0.15	0.20±0.11	0.69±0.19	0.24±0.12	0.14±0.09

4	$^{28}\text{Si}_{14}$	14	954	179 / 102	0.56 ± 0.17	0.22 ± 0.14	0.15 ± 0.12	0.52 ± 0.15	0.39 ± 0.20	0.29 ± 0.19
JINR										
5	$^{32}\text{S}_{16}$	3.7	103 3	148 / 128	0.54 ± 0.15	0.24 ± 0.14	0.16 ± 0.11	0.52 ± 0.17	0.50 ± 0.19	0.38 ± 0.18
6	$^{28}\text{Si}_{14}$	3.7	129 9	233 / 172	0.54 ± 0.15	0.25 ± 0.15	0.17 ± 0.13	0.50 ± 0.15	0.53 ± 0.18	0.40 ± 0.18
7	$^{28}\text{C}_{14}$	3.7	148 7	356 / 232	0.55 ± 0.15	0.29 ± 0.15	0.18 ± 0.13	0.47 ± 0.14	0.45 ± 0.22	0.31 ± 0.21
8	$^{22}\text{Ne}_{10}$	3.7	427 5	789 / 439	0.54 ± 0.15	0.24 ± 0.13	0.15 ± 0.12	0.49 ± 0.14	0.44 ± 0.19	0.32 ± 0.19

Обсуждение результатов

В настоящей работе показано, что начальные условия взаимодействий тяжелых первичных ионов с тяжелыми ядрами мишеней в среднем обладают достаточно регулярным поведением. Напротив, начальные условия соударений легких ионов с легкими ядрами мишеней демонстрируют сильно флуктуирующую картину. Эти результаты показывают, что понимание флуктуаций начального состояния возбужденной партонной системы в отдельных взаимодействиях ядер является важным этапом решения актуальных проб-лем эволюции множественных и фрагментационных процессов [7, 8]. Близкая постановка вопросов была рассмотрена на мини-симпозиуме on Initial State Fluctuations in Relativistic Heavy Ion Collisions, организованном на конференции по ядерной физике Американского физического общества 24–27 октября 2012 г. (Ньюпорт, Калифорния). В приглашенном докладе [9] «Initial State and Hydrodynamic Models for Particle Production from Little Bangs» было подчеркнуто, что оценка начального состояния системы и ее флуктуаций по наблюдаемым переменным является ключевым элементом понимания свойств систем, рожденных во взаимодействиях ядер. В развитие этой темы в [10] были рассмотрены вопросы оценки начальных условий на основе анализа совокупности параметров взаимодействий ионов высоких энергий. Таким образом, совершенно очевидно, что глауберовское описание сталкивающихся ядер в виде геометрически правильных сфер или релятивистски сжатых дисков может служить лишь первым приближением к реальной картине взаимодействий.

Более того, следует подчеркнуть, что проблемы флуктуаций барионной материи при экстремальных усло-виях начинают приобретать важное самостоятельное значение. Европейский центр теоретической ядерной фи-зики в 2012 г. организовал по этой проблематике конференцию «Initial State Fluctuations and Final State Corre-lations in Heavy Ion Collisions», (2-6 Jul, 2012, Trento, Italy). Отметим два доклада с этой конференции по проб-лемам RHIC-экспериментов, наиболее близких по постановке вопросов к нашей тематике. Это «Participant Geo-metry and Flow Fluctuations» [11] и «Initial State Fluctuations and Final State Flows in Heavy Ion Collisions» [12].

Выводы

При оценке роли начальных условий в столкновениях тяжелых (Au-79 и Pb-82), средних (Si и S) и легких ионов (O, Ne и C) с тяжелыми и легкими ядрами эмульсии установлено, что:

1. В JINR-AGS-SPS экспериментах начальные условия столкновений ядер в пределах статистической обеспеченности не зависят от энергии.

2. Регулярное поведение начальных условий во взаимодействиях ядер достаточно четко проявляется при высоких относительных множественностях $N_s/N_s \text{ max} \sim 0.8$ и малых значениях $A/A \text{ max} \sim 0.05$ нормированной суммы масс быстрых фрагментов.

2.1. Наиболее отчетливая картина поведения начальных условий взаимодействия ядер проявляется в варианте анализа взаимодействий тяжелых (Au-79 и Pb-82) первичных ионов с тяжелыми (Ag-47 и Br-35) ядрами эмульсии.

2.2. Взаимодействия средних (Si-14 и S-16) и легких (Ne-10, O-8 и C-6) ионов с легкими (C-6, N-7, O-8) ядрами эмульсии приводят к размытой картине поведения начальных условий.

ЛИТЕРАТУРА

1 Hunting the Quark Gluon Plasma, Results from the first 3 years at RHIC, April 18, 2005, Report BNL-73847-2005, 361 p.

2 <http://theor.jinr.ru/twiki/cgi/view/NICA/webHome>

3 <http://www.fair-center.de>.

4 <http://www.bnl.gov/npp>.

5 <http://na61.web.cern.ch>

6 List of Super Proton Synchrotron experiments in <http://en.wikipedia.org/wiki/NA61/SHINE>

7 Аргынова А.Х., Гайтинов А.Ш., Локтионов А.А. и др. Особенности фрагментации ядер Au (10.7 А·ГэВ) и Pb (158 А·ГэВ) во взаимодействиях с ядрами эмульсии // Матер. 8-ой междунар. Конф. ICNRP 2011, «Ядерная и радиационная физика» / ИЯФ НЯЦ РК, Алматы, 2011. – С. 248-250.

8 Аргынова А.Х., Гайтинов А.Ш., Локтионов А.А. и др. Эволюция возбужденного файерболла во взаимодействиях ионов Au и Pb с тяжелыми ядрами эмульсии при энергиях AGS и SPS ускорителей // Матер. 8-ой междунар. конф. ICNRP 2011 / «Ядерная и радиационная физика», ИЯФ НЯЦ РК, Алматы, 2011. – С. 275-279.

9 Schenke B. – Initial State and Hydrodynamic Models for Particle Production from Little Bangs, Mini-Symposium on Initial State Fluctuations in Relativistic Heavy Ion Collisions, воркшоп по ядерной физике 24-27 октября 2012 г. Ньюпорт, Калифорния.

10 Soltz R., Garishvili I., Abelev B. Using Data to Determine the Initial Condition in Heavy Ion Collisions, Mini-Symposium on Initial State Fluctuations in Relativistic Heavy Ion Collisions, воркшоп по ядерной физике 24–27 октября 2012 г. Ньюпорт, Калифорния.

11 Roland G. Participant Geometry and Flow Fluctuations, Conf. Initial State Fluctuations and Final State Correlations in Heavy Ion Collisions, 2-6 Jul, 2012, Trento, Italy.

12 Heinz U. Initial State Fluctuations and Final State Flows in Heavy Ion Collisions, Conf. Initial State Fluctuations and Final State Correlations in Heavy Ion Collisions, 2-6 Jul, 2012, Trento, Italy.

REFERENCES

1 Hunting the Quark Gluon Plasma, Results from the first 3 years at RHIC, April 18, 2005, Report BNL-73847-2005, 361 p.

2 <http://theor.jinr.ru/twiki-cgi/view/NICA/webHome>

3 <http://www.fair-center.de>.

4 <http://www.bnl.gov/npp>.

5 <http://na61.web.cern.ch>

6 List of Super Proton Synchrotron experiments in <http://en.wikipedia.org/wiki/NA61/SHINE>

7 Argynova A.H., Gajtinov A.Sh., Loktionov A.A. i dr. Osobennosti fragmentacii jader Au (10.7 A-GjeV) i Pb (158 A-GjeV) vo vzaimodejstvijah s jadrami jemul'sii Mater. 8-oj mezhdunar. Konf. ICNRP 2011, «Jadernaja i radiacionnaja fizika» IJaF NJaC RK, Almaty, 2011. – S. 248-250.

8 Argynova A.H., Gajtinov A.Sh., Loktionov A.A. i dr. Jevoljucija vozvuzhdenogo fajerbolla vo vzaimodejstvijah ionov Au i Pb s tjazhelymi jadrami jemul'sii pri jenergijah AGS i SPS uskoritelej Mater. 8-oj mezhdunar. Konf. ICNRP 2011 «Jadernaja i radiacionnaja fizika», IJaF NJaC RK, Almaty, 2011. – S. 275-279.

9 Schenke B. – Initial State and Hydrodynamic Models for Particle Production from Little Bangs, Mini-Symposium on Initial State Fluctuations in Relativistic Heavy Ion Collisions, vorkshop po jadernoj fizike 24-27 oktjabrja 2012 g. N'juport, Kalifornija.

10 Soltz R., Garishvili I., Abelev B. Using Data to Determine the Initial Condition in Heavy Ion Collisions, Mini-Symposium on Initial State Fluctuations in Relativistic Heavy Ion Collisions, vorkshop po jadernoj fizike 24-27 oktjabrja 2012 g. N'juport, Kalifornija.

11 Roland G. Participant Geometry and Flow Fluctuations, Sonf. Initial State Fluctuations and Final State Correlations in Heavy Ion Collisions, 2-6 Jul, 2012, Trento, Italy.

12 Heinz U. Initial State Fluctuations and Final State Flows in Heavy Ion Collisions, Sonf. Initial State Fluctuations and Final State Correlations in Heavy Ion Collisions, 2-6 Jul, 2012, Trento, Italy.

А. Х. Арғынова, А. Ш. Гайтинов, А. А. Локтионов, П. Б. Харчевников

(Физика-техникалық институты, Алматы)

JINR–AGS–SPS ЭНЕРГИЯЛАРДА АУЫР ЖӘНЕ ЖЕҢІЛ ЯДРОЛАРДЫҢ ӘРЕКЕТТЕСТІКТЕРІНІҢ БАСТАПҚЫ ШАРТТАРЫН БАҒАЛАУ

Релятивистік ядролық физиканың қазіргі келелі мәселелерінің өзектілігі реакция көлемінде ядролардың соқтығысуынан туындайтын, жоғары қысымдар мен температуралар жағдайында заттың адрондық күйден кварк-глюондық плазмаға фазалық өту үрдістерін іздеу және талдау міндеттерінің ерекше маңыздылығымен анықталады. Зарядталған бөлшектердің жиындылығы жоғары энергиялы иондардың соқтығысуларында пайда болған қоздырылған заттың қасиеттерінің басты бақыланатын сипаттамасы болып табылады. Жиындылық өзара әрекеттесетін ядролардың энергиясы және массаларымен ғана емес, сонымен бірге соқтығысатын нысандардың жапсарласу дәрежесімен де анықталады. Сондықтан «ақиқат» динамикалық үрдіс-терді зерттеу үшін ядролар соқтығысуының өзгертетін геометриясының әсерін алып тастау қажет болады. Ядролардың жеке соқтығысуларында бастапқы шартты бағалау жиынды-фрагментациялы корреляциялық талдау әдістерінің негізінде орындалды. Зерттеулер JINR–AGS–SPS энергияларда (C, O, Ne) – алғашқы жеңіл, (Si, S) – орташа және (Au, Pb) – ауыр иондардың эмульсияның (Ag/Br) – ауыр және (C/N/O) – жеңіл ядроларымен өзара әрекеттесуі үшін жүргізілді. Бастапқы иондардың кең массалар спектрі мен энергиялары әрекеттесулердің бастапқы шарттарын «екі өлшемді сканерлеуді» орындауға және күтілетін трендті бағалауға мүмкіндік береді.

Кілт сөздер: Жоғары энергиялы иондардың физикасы, адрондардың деконфайнменті, ядро-ядролық әрекеттестік, JINR–AGS–SPS энергиялар, бастапқы шарт, жиынды-фрагментациялы корреляциялық талдау.

Summary

A. H. Argynova, A. Sh. Gaytinov, A. A. Loktionov, P. B. Harchevnikov

(Physical-Technical Institute, Almaty, Kazakhstan)

INITIAL EVALUATION OF INTERACTION HEAVY AND LIGHT NUCLEI AT JINR-AGS-SPS ENERGIES

The urgency of modern problems of relativistic nuclear physics is defined by exclusive importance of problems of search and the analysis of processes of phase transition of matter from hadron state to a quark-gluon plasma in the conditions of high pressures and temperatures created in volume of reaction in nucleus-nucleus collisions. Charged particle multiplicity is a key observable to characterize the properties of excited matter created in high energy ion collisions. Multiplicity is defined not only energy and mass of colliding nuclei, but also overlapping degree colliding objects. Therefore, it is necessary to exclude influences of changing geometry of nucleus-nucleus collision for research of «true» dynamic processes. The initial condition estimation in individual nucleus-nucleus collisions has been performed on the basis multiplicity-fragmentation correlation analysis methods. The investigations have been made for the interaction of primary light – (C, O, Ne), average – (Si, S) and heavy – (Au, Pb) ions with heavy – (Ag/Br) and light – (C/N/O) emulsion nuclei at JINR–AGS–SPS energies. The wide spectrum of mass and energy of primary ions will allow us to perform «two-dimensional scanning» initial conditions of the interactions and to estimate expected trends.

Keywords: High energy ions physics, hadron deconfinement, nucleus-nucleus collisions, JINR–AGS–SPS energies, initial conditions, multiplicity-fragmentation correlation analysis.

Поступила 27.03.2013г.