




MPHTI 29.05.29

<https://doi.org/10.26577/RCPH.2023.v87.i4.02>

А.И. Федосимова^{1,2} , И.А. Лебедев^{2,*} , Е.А. Дмитриева² ,
Е.А. Бондарь² , Х.К. Олимов³ , С.А. Ибраимова² , Е.Б. Муканов² 

¹Институт ядерной физики, Казахстан, г.Алматы

²Физико-технический институт, Satbayev University, Казахстан, г.Алматы

³Физико-технический институт Академии наук Узбекистана, Узбекистан, г.Ташкент

*e-mail: lebedev692007@yandex.ru

ГЕОМЕТРИЯ СТОЛКНОВЕНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР И КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ КРИВЫЕ ХЕРСТА

Согласно теоретическим предсказаниям, смешанная фаза "возбужденной адронной материи", включающая как свободные кварки и глюоны, так и протоны с нейтронами, должна образовываться в диапазоне энергий от 4 до 11 ГэВ на нуклон. Эксперименты, проводимые на встречных пучках, имеют существенные мертвые зоны, в которых вторичные частицы и фрагменты взаимодействующих ядер не регистрируются. В связи с этим недостаточно информации о начальном состоянии взаимодействия. В данной работе проведены исследования взаимодействия релятивистских ядер с помощью фотоэмульсионной методики. Данный метод (облучение неподвижной мишени в трековом детекторе) дает возможность получить параметры вторичных частиц и фрагментов взаимодействующих ядер во всем пространственном диапазоне. Анализ был проведен с использованием экспериментальных данных, полученных на синхротроне BNL. Эмульсионные пластины NIKFI BR-2, включающие легкие (HCNO) и тяжелые (AgBr) ядра, облучались пучком ¹⁹⁷Au с энергией 10.6 АГэВ. В данной работе мы провели совместное исследование многочастичных псевдобыстротных корреляций вторичных частиц и флуктуаций в распределениях фрагментов взаимодействующих ядер на основе событийного анализа для поиска нестатистических кластеров вторичных частиц и с учетом геометрии ядро-ядерного столкновения. Для изучения корреляций мы применили метод корреляционных кривых Херста. Все события были разделены на четыре типа: некоррелированные, с корреляциями струйного типа, с корреляциями кластерного типа и с корреляциями смешанного типа. События разных типов существенно различаются фрагментацией ядра-снаряда, множественностью вторичных частиц и псевдобыстротным распределением. События смешанного типа имеют «аномальное» распределение псевдобыстрот: образуются две группы вторичных частиц с существенно различающимися псевдобыстротами. События в основном соответствуют центральным взаимодействиям тяжелых ядер Au с легкими ядрами CNO.

Ключевые слова: ядро-ядерные взаимодействия, начальное состояние столкновения, фрагментация, индекс Херста.

A.I. Fedosimova^{1,2}, I.A. Lebedev^{2,*}, E.A. Dmitrieva²,
E.A. Bondar², H.K. Olimov³, S.A. Ibraimova², E.B. Mukanov²

¹Institute of Nuclear Physics, Kazakhstan, Almaty

²Institute of Physics and Technology, Satbayev University, Kazakhstan, Almaty

³Physical-Technical Institute of the Academy of Sciences of Uzbekistan, Uzbekistan, Tashkent

*e-mail: ananastasia@list.ru; lebedev692007@yandex.ru

Geometry of relativistic nuclei collision and hurst correlation curves

According to theoretical predictions, the mixed phase of "excited hadronic matter", including both free quarks and gluons, and protons with neutrons, should be formed in the energy range from 4 to 11 GeV per nucleon. Experiments performed with colliding beams have significant dead zones in which secondary particles and fragments of interacting nuclei are not detected. In this regard, there is not enough information about the initial state of the interaction. In this work, studies of the interaction of relativistic nuclei were carried out

using a photoemulsion technique. This method (irradiation of a fixed target in a track detector) makes it possible to obtain the parameters of secondary particles and fragments of interacting nuclei in the entire spatial range. The analysis was carried out using experimental data obtained at the BNL synchrotron. NIKFI BR-2 emulsion plates, including light (HCNO) and heavy (AgBr) nuclei, were irradiated with a ^{197}Au beam with an energy of 10.6 AGeV. In this work, we have jointly studied many-particle pseudorapidity correlations of secondary particles and fluctuations in the distributions of fragments of interacting nuclei based on event-by-event analysis to search for non-statistical clusters of secondary particles and taking into account the geometry of a nucleus-nucleus collision. To study correlations, we applied the method of correlation curves of Hurst. All events were divided into four types: uncorrelated, with jet-type correlations, with cluster-type correlations, and with mixed-type correlations. Events of different types differ significantly in the fragmentation of the projectile nucleus, the multiplicity of secondary particles, and the pseudorapidity distribution. Mixed-type events have an "anomalous" distribution of pseudorapidities: two groups of secondary particles are formed with significantly different pseudorapidities. The events mainly correspond to the central interactions of heavy Au nuclei with light CNO nuclei.

Key words: nucleus-nucleus interactions, initial state of collision, fragmentation, Hurst index.

А.И. Федосимова^{1,2}, И.А. Лебедев^{2*}, Е.А. Дмитриева²,
Е.А. Бондарь², Х.К. Олимов³, С.А. Ибраимова², Е.Б. Муканов²

¹Ядролық физика институты, Қазақстан, Алматы қ.

²Физика-техникалық институт, Satbayev University, Қазақстан, Алматы қ.

³Өзбекстан Ғылым академиясының Физика-техникалық институты, Өзбекстан, Ташкент қ.

*e-mail: ananastasia@list.ru; lebedev692007@yandex.ru

Релятивистік ядролардың соқтығысу геометриясы және Херсттің корреляциялық қисықтары

Теориялық болжамдарға сәйкес, бос кварктар мен глюондарды да, нейтрондары бар Протондарды да қамтитын "қозған адрон материясының" аралас фазасы бір нуклонға 4-тен 11 ГэВ-қа дейінгі энергия диапазонында түзілуі керек. Қарама-қарсы сәулелерде жүргізілген эксперименттерде өзара әрекеттесетін ядролардың қайталама бөлшектері мен фрагменттері тіркелмейтін маңызды өлі аймақтар бар. Осыған байланысты өзара әрекеттесудің бастапқы жағдайы туралы ақпарат жеткіліксіз. Бұл жұмыста фотоэмульсиялық әдістеме арқылы релятивистік ядролардың өзара әрекеттесуіне зерттеулер жүргізілді. Бұл әдіс (трек детекторындағы қозғалмайтын нысанды сәулелендіру) бүкіл кеңістіктік диапазондағы өзара әрекеттесетін ядролардың қайталама бөлшектері мен фрагменттерінің параметрлерін алуға мүмкіндік береді. Талдау BNL синхротронында алынған эксперименттік деректерді пайдалана отырып жүргізілді. Жеңіл (HCNO) және ауыр (AgBr) ядроларды қамтитын NIKFI BR-2 эмульсиялық тақталары 10.6 АГэВ энергиясымен ^{197}Au сәулесімен сәулеленді. Бұл жұмыста біз қайталама бөлшектердің статистикалық емес кластерлерін іздеу үшін және ядролық-ядролық соқтығысу геометриясын ескере отырып, оқиғаны талдау негізінде өзара әрекеттесетін ядролардың фрагменттерінің үлестірімдеріндегі қайталама бөлшектердің көп бөлшекті псевдо-жылдамдық корреляциясы мен тербелістеріне бірлескен зерттеу жүргіздік. Корреляцияны зерттеу үшін біз Херсттің корреляциялық қисық әдісін қолдандық. Барлық оқиғалар төрт түрге бөлінді: корреляцияланбаған, реактивті типтегі корреляциялармен, кластерлік типтегі корреляциялармен және аралас типтегі корреляциялармен. Әр түрлі типтегі оқиғалар ядро-снаряд фрагментациясымен, қайталама бөлшектердің көптігімен және псевдо-жылдам таралуымен айтарлықтай ерекшеленеді. Аралас типтегі оқиғалар псевдо-жылдамдықтардың "қалыптан тыс" таралуына ие: псевдо-жылдамдықтары айтарлықтай ерекшеленетін қайталама бөлшектердің екі тобы түзіледі. Оқиғалар негізінен ауыр Au ядроларының жеңіл CNO ядроларымен орталық өзара әрекеттесуіне сәйкес келеді.

Түйін сөздер: ядро-ядролық өзара әрекеттесу, соқтығысудың бастапқы күйі, фрагментация, Херст индексі.

Введение

Согласно современным представлениям, адронное вещество переходит в результате взаимодействий ядер при высоких энергиях в состояние кварк-глюонной плазмы (КГП), в котором кварки и глюоны пребывают в квазисвободном состоянии [1].

Изучение кварк-глюонной плазмы в основном сосредоточено на двух взаимодополняющих направлениях. Первое направление связано с исследованиями взаимодействий тяжелых ионов при максимально доступных энергиях для изучения ядерной материи при очень высоких температурах и низких барионных плотностях [2-5]. Второе направление сосредоточено на поиске критической точки фазового перехода адронной материи в состояние кварк-глюонной плазмы. Предполагается, что он находится в диапазоне энергий от нескольких ГэВ до нескольких десятков ГэВ. Во-первых, считается, что исследования вблизи критической точки фазового перехода в кварк-глюонную плазму дадут возможность получить качественно новые результаты по динамике процесса. Во-вторых, согласно теоретическим предсказаниям, смешанная фаза "возбужденной адронной материи", включающая как свободные кварки и глюоны, так и протоны с нейтронами, должна образовываться в диапазоне энергий от 4 до 11 ГэВ на нуклон [6-9]. Однако, некоторые модели взаимодействия ядер не требуют образования смешанной фазы при энергиях соразмерных с десятками ГэВ [10-15].

Изучение многочастичных корреляций и флуктуаций распределения вторичных частиц часто используется для поиска кварк-глюонной плазмы, поскольку образование вторичных частиц из файерболла носит коллективный характер [16-19]. Трудность в идентификации образования кварк-глюонной плазмы заключается главным образом в том, что она образуется на обширном фоне из-за обычных процессов сильного взаимодействия. Начальное состояние, о котором обычно имеется очень мало прямой экспериментальной информации, приводит к значительным флуктуациям в распределении вторичных частиц и фрагментов [20-23].

При центральном столкновении взаимодействует максимальное число нуклонов. Если столкновение периферийное, то перекрытие ядер является неполным, и кварк-глюонная плазма генерируется только частью протонов и нейтронов из каждого ядра. Следовательно,

файерболл расширяется асимметрично [24-27]. Для разделения флуктуаций, связанных с геометрией столкновений, часто используют пособытийный анализ [28-31]. Изучение отдельных событий может выявить совершенно иную физику, чем анализ средних значений по большому количеству событий. Предполагается, что, детально проанализировав данные о каждом отдельном событии, можно будет непосредственно наблюдать эффекты фазового перехода в рамках тех событий, при которых сформировались наиболее благоприятные условия для генерации кварк-глюонной плазмы.

Дополнительную информацию о геометрии столкновения дает анализ фрагментов сталкивающихся ядер. Нуклоны взаимодействующих ядер можно разделить на две отдельные категории: те, которые участвуют в неупругом столкновении по крайней мере с одним нуклоном из противоположного ядра (участники), и те, которые этого не делают (наблюдатели). Участники образуют вторичные частицы, наблюдаемые в детекторах. Фрагменты сталкивающихся ядер состоят из нуклонов-наблюдателей [32]. Чем больше перекрытие взаимодействующих ядер, тем ниже должен быть суммарный заряд фрагментов. Таким образом, анализ фрагментации должен значительно повысить точность оценки параметров начального состояния взаимодействия. В экспериментах со сталкивающимися пучками информация о фрагментации снаряда обычно недоступна. Следовательно, для оценки геометрии столкновения эксперимент на ускорителе с неподвижной мишенью имеет преимущества [33, 34]. Режим фиксированной цели также позволяет нам изучать редкие процессы и измерять параметры, необходимые для анализа данных о космических лучах [35-39].

В этой работе мы провели совместное исследование многочастичных корреляций и флуктуаций псевдобыстроты для отдельных событий для поиска нестатистических кластеров вторичных частиц. С этой целью мы проанализировали как вторичные частицы, испускаемые из области взаимодействия, так и фрагменты ядра-снаряда и ядра-мишени.

Методы исследования

Для изучения корреляций мы использовали метод Херста [40]. Анализ поведения кривой Херста позволяет отличить стохастические флуктуации, связанные со статистическими эффектами, от коррелированных распределений и оценить "силу" и "длину" многочастичных

корреляций в распределении псевдобыстроты вторичных частиц [44].

Анализ был проведен с использованием данных, полученных с помощью трекового детектора ядерной эмульсии. Эмульсионные пластины NIKFI BR-2 были подвергнуты воздействию пучка ^{197}Au с энергией 10.6 ГэВ на синхротроне BNL [45]. В измеренных взаимодействиях все заряженные вторичные частицы были классифицированы в соответствии с общепринятой методикой эмульсионного эксперимента [46].

Результаты и обсуждение

Флуктуации средней псевдобыстроты события

В сильно центральных и слабо центральных событиях образовавшиеся из фэйрбола ядра-участники по-разному распространяется после взаимодействия. Таким образом, в зависимости от геометрии столкновения должны обнаруживаться флуктуации среднего значения псевдобыстротного распределения вторичных частиц. На рисунке 1 показано схематическое изображение взаимодействия ядер с разной степенью центральности. Нуклоны-участники (на основе геометрических представлений) отмечены темным цветом. Светлый цвет указывает на нуклоны-наблюдатели, которые образуют фрагменты ядра-снаряда и ядра-мишени.

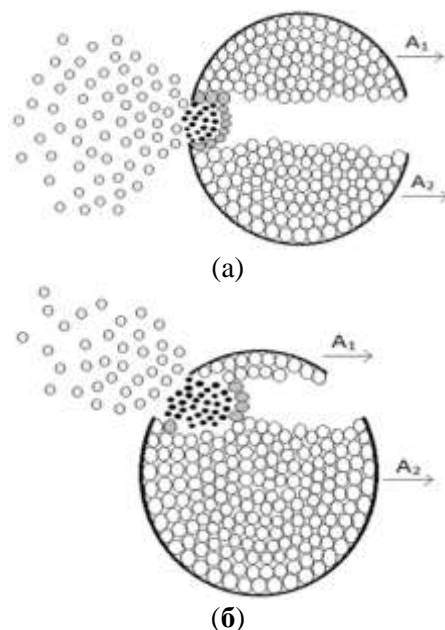


Рисунок 1 – Схематическое изображение взаимодействия ядер с разной степенью центральности: (а) Сильно центральные и (б) слабо центральные события

Для изучения флуктуаций в каждом событии была рассчитана средняя псевдобыстрота $\langle \eta \rangle$ для поиска возможного отклонения направления испускания вторичных частиц из-за геометрии столкновения или других причин. Затем было построено распределение средней псевдобыстроты, рассчитанное для каждого отдельного события.

На рисунке 2а показано распределение $\langle \eta \rangle$ для неупругих взаимодействий Au + Em с энергией 10.6 АГэВ. Как видно из рисунка 2а, распределение $\langle \eta \rangle$ является асимметричным. Похоже, что два распределения со средними значениями $\langle \eta \rangle \sim 2.35$ и $\langle \eta \rangle \sim 2.85$ перекрываются. Для сравнения на рисунке 2б показано такое же распределение для экспериментальных данных Si+Em 14.6 АГэВ [47]. В соответствии с рисунком 2а распределение $\langle \eta \rangle$ для Si + Em 14.6 ГэВ (рисунок 2б) не имеет характерного выпуклости в области большого $\langle \eta \rangle$.

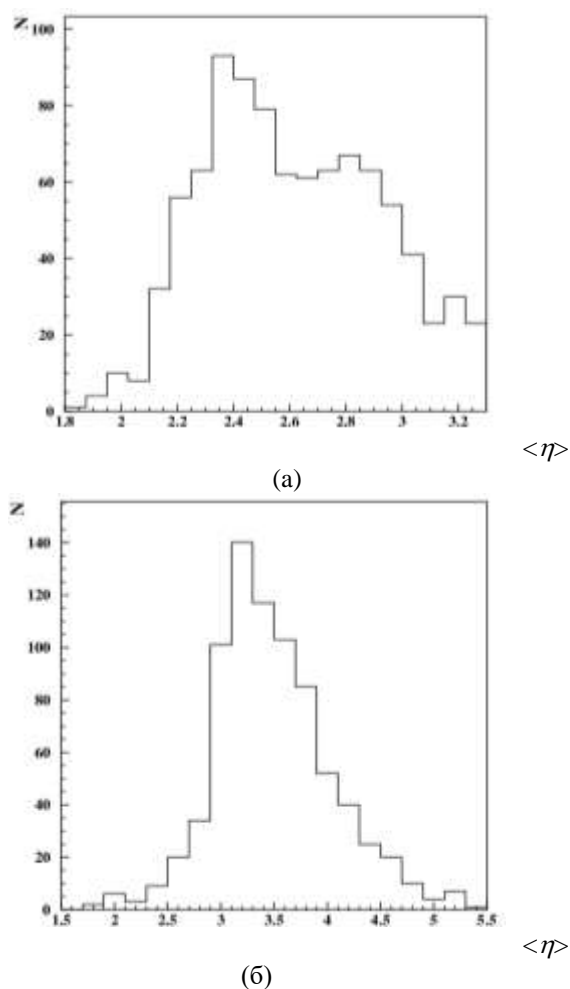
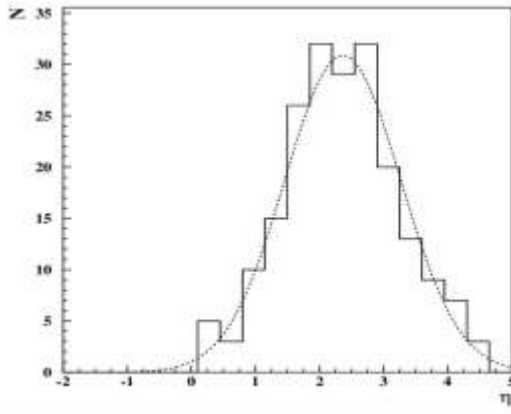
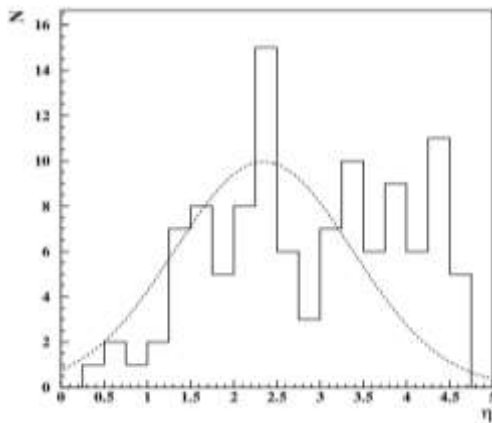


Рисунок 2 – Распределение средней псевдобыстроты в случае: (а) Au + Em 10.6 ГэВ и (б) Si + Em 14.6 ГэВ

Чтобы исследовать эту особенность более подробно, мы проанализировали распределения псевдобыстроты отдельных событий, которые имеют $\langle \eta \rangle$ в интервалах от 2.3 до 2.4 и от 2.8 до 2.9, сравнив их друг с другом. Распределения для случайно выбранных событий для каждого из этих интервалов показаны на рисунке 3.



(а)



(б)

Сплошные линии – экспериментальные псевдобыстротные распределения. Пунктирные линии – фит (с помощью функции Гаусса) события, представленный на рисунке 3а и нормированный по множественности вторичных частиц

Рисунок 3 — Псевдобыстротное распределение двух характерных событий Au + Em 10.6 АГэВ со средней псевдобыстротой в интервалах: (а) от 2.3 до 2.4 и (б) от 2.8 до 2.9

Как видно из рисунка 3а, события из первого интервала имеют структуру, подобную гауссовой. Сплошными линиями на рисунке показаны экспериментальные распределения псевдобыстроты. Пунктирные линии соответствуют фите (аппроксимации) этого распределения с помощью функции Гаусса. События из второго интервала (рис. 3б) имеют более сложную структуру по сравнению с событиями, показанными на рис. 3а. Для

сравнения фит, представленный на рисунке 3а, был нормирован на множественность события и наложен на распределение, представленное на рисунке 3б.

В событиях, показанных на рисунке 3б, в дополнение к "стандартной" группе частиц, испускаемых с псевдобыстротой $\eta \sim 2.35$, значительная часть частиц имеет $\eta \sim 4$. Более того, в некоторых событиях распределение выглядит как двухгорбовое распределение.

Таким образом, можно констатировать, что в результате взаимодействия ядер золота с ядрами эмульсии при некоторых "аномальных" событиях образуются два потока вторичных частиц со значительно различной псевдобыстротой. Чтобы понять, являются ли эти "аномальные" события взаимодействиями ядер золота с тяжелыми или легкими ядрами эмульсии, мы проанализировали корреляции между значениями распределения псевдобыстроты s -частиц и общим зарядом ядра-снаряда. Результаты анализа показаны на рисунке 4. Как видно из рисунка 4, среднее значение псевдобыстротного распределения частиц ливня для взаимодействий ядер золота с ядрами CNO находится в области $\langle \eta \rangle \sim 2.85$. Среднее значение псевдобыстротного распределения частиц ливня для взаимодействий ядер золота с тяжелыми ядрами AgBr находится в области $\langle \eta \rangle \sim 2.35$.

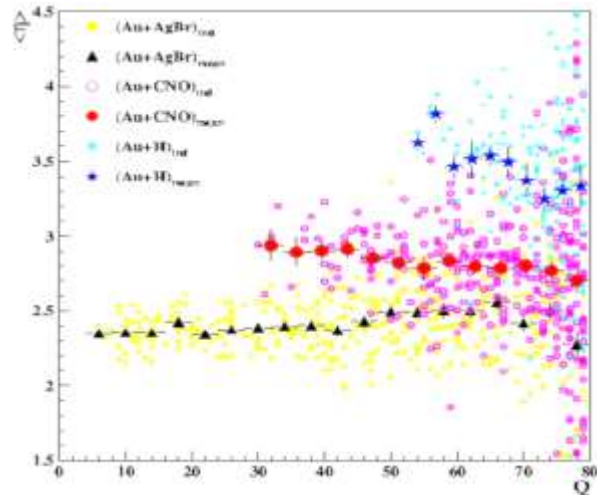


Рисунок 4 – Средние значения распределения псевдобыстроты s -частиц в зависимости от суммарного заряда снаряда-ядра Au-197 с тяжелыми и легкими эмульсионными ядрами

Следует отметить, что для центральных взаимодействий Au + CNO более высокой степени центральности, которые характеризуются меньшим значением суммарного заряда остаточных фрагментов ядра снаряда, наблюдаются более высокие значения средней псевдобыстроты. Во взаимодействиях Au + AgBr наблюдается противоположный

эффект: с увеличением степени центральности взаимодействия (то есть для взаимодействий с более низким значением Q) средняя псевдобыстрота уменьшается.

Вопрос о том, почему аномальное распределение псевдобыстроты (обнаруживаемое при взаимодействиях Au + CNO) не наблюдается при взаимодействиях Si + CNO, требует тщательного изучения. Вероятно, это связано со значительно различной степенью асимметрии взаимодействующих ядер. Для количественной характеристики удобно использовать параметр асимметрии (L), который представляет собой отношение числа нуклонов ядра-снаряда к числу нуклонов ядра-мишени. При взаимодействии ядра золота (Au-197) с ядром серебра (Ag-108) параметр асимметрии равен $L = 197/108 = 1,82$. Для взаимодействий (Au + O) $L = 197/16 = 12,31$. При взаимодействиях ядра кремния (Si-32) с ядром кислорода $L = 32/16 = 2$. Таким образом, параметр асимметрии взаимодействий (Si + CNO) приблизительно равен параметру асимметрии взаимодействий (Au + AgBr) и значительно меньше, чем L для (Au + CNO) взаимодействия.

Чтобы понять особенности “аномальных” распределений псевдобыстроты, был проведен поиск коррелированных групп вторичных частиц с использованием метода Херста.

Метод Херста

Классический метод Херста был разработан для анализа корреляций во временных последовательностях и широко применяется в различных сферах [40-43]. Если некоторая анализируемая последовательность ξ_i некоррелирована, то сумма флуктуаций на достаточно большом исследуемом интервале вариации последовательности $\xi_i (i \gg 1)$ будет стремиться к нулю. Соответствующий сигнал может быть обнаружен, если $\sum(\xi_i - \langle \xi_i \rangle)$ значительно отличается от нуля.

Для количественной оценки степени корреляции используются две основные величины: стандартное отклонение $S(k)$ и так называемый диапазон $R(k)$. Для вычисления диапазона вычисляются накопленные колебания $X(m,k)$ последовательности относительно среднего значения $\langle \xi_i \rangle$:

$$X(m, k) = \sum_{i=1}^m [\xi_i - \langle \xi \rangle], \quad 1 \leq i \leq m \leq k, \quad (1)$$

$$\langle \xi \rangle = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \xi_i. \quad (2)$$

Диапазон определяется как разница между максимальным и минимальным значениями $X(m, k)$. Далее нормализованный диапазон $H(k)$, то есть отношение диапазона к стандартному отклонению, вычисляется по следующим формулам:

$$S(k) = \left[\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k [\xi_i - \langle \xi \rangle]^2 \right]^{1/2}, \quad (3)$$

$$R(k) = \underbrace{\max_{1 \leq m \leq k} X(m, k)} - \underbrace{\min_{1 \leq m \leq k} X(m, k)} \quad (4)$$

$$H(k) = R(k)/S(k). \quad (5)$$

Сила и продолжительность корреляций оцениваются на основе следующего соотношения:

$$H(k) = (ak)^h. \quad (6)$$

Параметр a в уравнении (6) в анализе не используется. Это так называемый свободный параметр. Параметр h – это индекс Херста – основной параметр, используемый для оценки силы корреляций. Если последовательность не коррелирована и представляет собой белый шум, то индекс корреляции (индекс Херста) будет равен 0,5. Если последовательность ξ_i является полностью коррелированным сигналом, то $h = 1$ [48]. Сила корреляции сигналов зависит от значения индекса Херста $0,5 \leq h \leq 1$. Чем выше значение h , тем более коррелированной является анализируемая последовательность. На рисунке 5 представлены два различных события взаимодействия ядер золота с ядрами фотоэмульсии. На рисунке видно, что показатели Херста для двух различных событий сильно отличаются друг от друга, что свидетельствует о наличии, либо отсутствии коррелированных групп частиц.

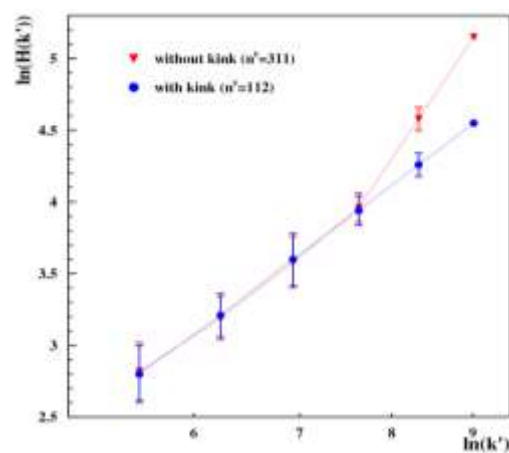


Рисунок 5 — Кривые Херста для двух характерных событий Au+Em 10.6 АГЭВ

Классификация событий по индексу Херста

Для анализа использовался центральный интервал псевдобыстрот от $\eta_{\min} = 0.6$ до $\eta_{\max} = 4.6$. Этот интервал псевдобыстроты разбит на $k = 1024$ частей. В каждом интервале подсчитывается количество частиц, попадающих в i -й подинтервал в отдельном событии (n_i^e) и число частиц, попадающих в тот же i -й подинтервал в общем псевдобыстротном распределении (n_i). Эти значения соответственно нормируются множественностью отдельного события (n^e) и множественностью суммарного псевдобыстротного распределения (n). Флуктуации в отдельном событии анализировались в следующем виде:

$$\xi_i = \left(\frac{n_i^e}{n^e} - \frac{n_i}{n} \right) / \frac{n_i}{n} \quad (7)$$

Был рассчитан нормированный диапазон $R(k)/S(k)$, соответствующий длине интервала псевдобыстроты $d\eta = 4$ ($k=1024$). После этого последовательность ξ_i была разбита пополам на две последовательности. В каждой из этих последовательностей был рассчитан нормированный диапазон $R(k)/S(k)$. Значение нормированного диапазона для этих двух частей усреднялось и, таким образом, вычислялся нормированный диапазон, соответствующий длине интервала псевдобыстрот $d\eta = 2$ ($k=512$).

Эта процедура деления интервала псевдобыстроты и вычисления нормализованного диапазона продолжалась до тех пор, пока количество подинтервалов не стало меньше 16 ($d\eta = 0.0625$), так как число членов анализируемой последовательности должно быть $\gg 1$. Полученные значения нормированного диапазона R/S в зависимости от длины интервала псевдобыстрот $d\eta$ определялись с помощью функции $H(k) = (ak)^h$ для нахождения значения индекса Херста.

В результате тщательного исследования все события были разделены на четыре типа: некоррелированные, с корреляциями струйного типа, с корреляциями кластерного типа и с корреляциями смешанного типа. События разных типов существенно различаются фрагментацией ядра-снаряда, множественностью вторичных частиц и псевдобыстротным распределением.

Поведение кривой Херста соответствует короткодействующим корреляциям в распределениях псевдобыстрот представленных на рисунке 6. Показатель Херста в событиях такого типа больше при малых интервалах

псевдобыстроты $d\eta < 0,25$ и меньше при интервалах псевдобыстроты $d\eta > 0,25$. В большинстве событий с короткодействующими корреляциями был обнаружен один многозарядный фрагмент ядра-снаряда. Такие события, скорее всего, связаны с центральными взаимодействиями с низкой степенью центральности.

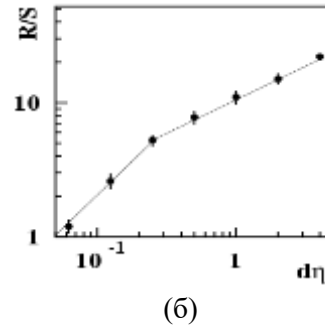
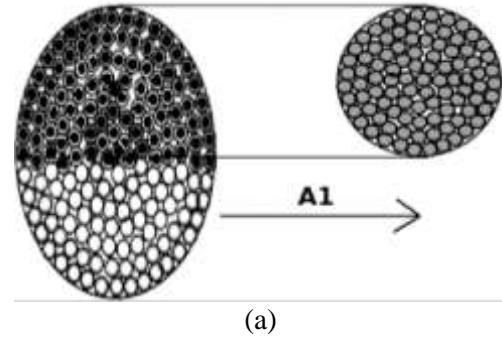
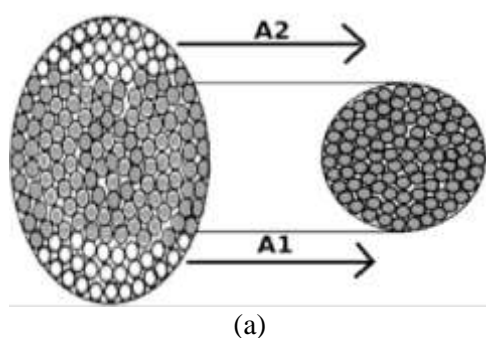


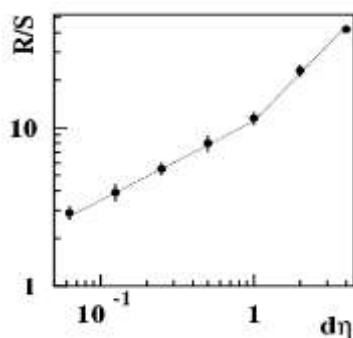
Рисунок 6 — центральные взаимодействия с низкой степенью центральности

В событиях, представленных на рисунке 7 показатель Херста меньше при малых интервалах $d\eta$ и при больших интервалах псевдобыстроты $d\eta > 1$ кривая Херста искривлена значительно сильнее. Такое поведение кривой Херста соответствует дальнедействующим корреляциям в распределениях псевдобыстрот. В большинстве событий этого типа наблюдается процесс полного разрушения ядра снаряда, который характеризуется отсутствием многозарядных фрагментов снаряда. События с дальними корреляциями имеют высокую среднюю множественность $\langle n_s \rangle \sim 272$. Такие события в основном соответствуют центральным взаимодействиям ядер золота с тяжелыми ядрами (AgBr) фотоэмульсии.

События, представленные на рисунке 8, имеют несколько многозарядных фрагментов ядра-снаряда и среднюю множественность $\langle n_s \rangle \sim 97$. Это события смешанного типа, в основном они соответствуют центральным взаимодействиям ядер золота с легкими ядрами CNO фотоэмульсии.

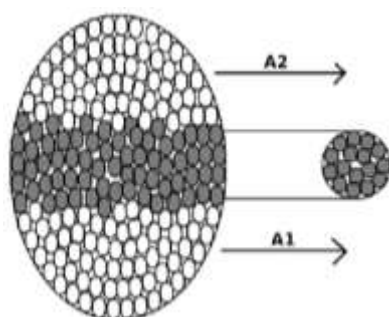


(a)

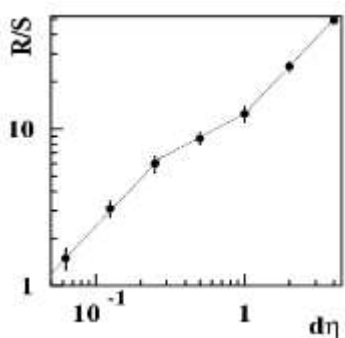


(б)

Рисунок 7 — центральные взаимодействия ядер золота с тяжелыми ядрами (AgBr) фотоэмульсии



(a)



(б)

Рисунок 8 — центральные взаимодействия ядер золота с легкими ядрами CNO фотоэмульсии

События смешанного типа имеют «аномальное» распределение псевдобыстрот: формируются два потока вторичных частиц с существенно различающимися псевдобыстротами.

Заключение

В этой статье представлено совместное исследование многочастичных корреляций и флуктуаций псевдобыстроты от события к событию в релятивистских взаимодействиях для взаимодействий ядер золота с энергией 10.6 ГэВ с ядрами фотоэмульсии. На основе анализа поведения индекса Херста все события были разделены на четыре типа: некоррелированные, с короткодействующими корреляциями, с далекодействующими корреляциями и смешанный тип. События разных типов существенно различаются фрагментацией ядра-снаряда, множественностью вторичных частиц и псевдобыстротным распределением. События смешанного типа имеют «аномальное» распределение псевдобыстрот: образуются две группы вторичных частиц с существенно различающимися псевдобыстротами. События в основном соответствуют центральным взаимодействиям тяжелых ядер Au с легкими ядрами CNO. Во взаимодействиях средних ядер Si с ядрами фотоэмульсии «аномальные» распределения псевдобыстрот не обнаружены. Вопрос о том, почему аномальное распределение псевдобыстрот (обнаруженное во взаимодействиях Au + CNO) не наблюдается во взаимодействиях Si + CNO, требует тщательного изучения. Вероятно, это связано с существенной разницей в степени асимметрии взаимодействующих ядер.

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP14869032).

Литература

- 1 Shuryak E. Strongly coupled quark-gluon plasma in heavy ion collisions // Reviews of modern physics. – 2017. – Vol. 89. – Art.No 035001.
- 2 ALICE Collaboration, Abelev B., et al. Centrality dependence of charged particle production at large transverse momentum in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s(NN)}=2.76$ TeV // Physics Letters. – 2013. – Vol. 720. – P.52-62.

- 3 Kh.K. Olimov, I.A. Lebedev, A.I. Fedosimova, Fu-Hu Liu, Elena Dmitriyeva, K.A. Musaev, K. Olimov, B.S. Yuldashev Correlations among parameters of the Tsallis distribution and Hagedorn function with embedded transverse flow in proton–proton collisions at (s)^{1/2} 7 and 13 TeV // *Eur. Phys. J. Plus.* – 2023. – Vol.138. – Art.No 414.
- 4 Olimov K.K. et al. Particle species and collision energy dependencies of the midrapidity average transverse momenta of identified charged particles in Au plus Au and Pb plus Pb collisions in (S-nn)^(1/2)=62-5020GeV energy range at RHIC and LHC // *International journal of modern physics E.* – 2021. – Vol.30. – No.04. – Art.No 2150029.
- 5 Acharya S., Adamova D., et al. Probing the Effects of Strong Electromagnetic Fields with Charge-Dependent Directed Flow in Pb-Pb Collisions at the LHC // *Physical Review Letters.* – 2020. – Vol.125. – Art.No.022301.
- 6 Ablyazimov T., et al. Challenges in QCD matter physics -The scientific programme of the Compressed Baryonic Matter experiment at FAIR // *European physical journal A.* – 2017. – Vol.53. – Art.No.60.
- 7 Bugaev K.A., et al. Thermodynamically anomalous regions and possible new signals of mixed-phase formation // *European physical journal A.* – 2016. – Vol. 52. – Art.No. 175.
- 8 Adamczyk L. et al. (STAR Collaboration) Bulk properties of the medium produced in relativistic heavy-ion collisions from the beam energy scan program // *Phys. Rev. C.* – 2017. – Vol. 96. – Art.No.044904.
- 9 Larionova D.M., et al. Measurement of Charged Hadron Production in Relativistic Ion Collision Systems // *Physics of Particles and Nuclei.* – 2023. – Vol. 54. – P.380-383.
- 10 Bopp F.W., et al. Learning from RHIC data with DPMJET-III // *Acta Physica Polonica B.* – 2004. – Vol. 35. – P. 03-307.
- 11 Capella A., et al. Dual parton model // *Physics Reports.* – 1994. – Vol. 236. – P. 225-329.
- 12 Kuroki K., Sakai A., Murase K., Hirano T. Hydrodynamic fluctuations and ultra-central flow puzzle in heavy-ion collisions // *Physics Letters, Section.* – 2023. – Vol.842. – Art.No.137958.
- 13 Golubtsova A., Tsegelnik N. Probing the holographic model of N=4 SYM rotating quark-gluon plasma // *Physical Review D.* – 2023. – Vol. 107. – Art.No.106017.
- 14 Somorendro Singh S., Jena M., Gupta K.K., Saxena G. Three loop correction in the formation of QGP droplet // *Indian Journal of Physics.* – 2023. – Vol.97. – 1543-1550.
- 15 Gazdzicki M., Gorenstein M.I., Mrowczynski S. Fluctuations and deconfinement phase transition in nucleus-nucleus collisions // *Physics letters B.* – 2004. – Vol. 585. – P. 115-121.
- 16 Weiyao K., Vitev I. Searching for QGP droplets with high-pT hadrons and heavy flavor // *Physical Review C.* – 2023. – Vol. 107. – Art.No.064903.
- 17 Nakamura K., Miyoshi T., Nonaka Ch., Takahashi H.R. Charge-dependent anisotropic flow in high-energy heavy-ion collisions from a relativistic resistive magneto-hydrodynamic expansion // *Phys. Rev. C.* – 2023. – Vol. 107. – Art.No.034912.
- 18 Lebedev I., Burtebayev N., Fedosimova A. Bondar E., and Ibraimova S. Collective formation of secondary particles in interactions of asymmetric nuclei // *Acta Physica Polonica B.* – 2021. – Vol. 14. – P.673.
- 19 Bhalerao R.S., Luzum M., Ollitrault J.Y. Determining initial-state fluctuations from flow measurements in heavy-ion collisions // *Physical review C.* – 2011. – Vol. 84. – Art.No.034910.
- 20 Gardim F.G., Giacalone G., Luzum M., Ollitrault J.Y. Effects of initial state fluctuations on the mean transverse momentum // *Nuclear physics A.* – 2021. – Vol. 1005. – Art.No.121999.
- 21 Fedosimova A., et al. Study on initial geometry fluctuations via correlation of finite distributions of secondary particles in nucleus-nucleus interactions // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2016. – Vol. 668. – Art.No.012067.
- 22 Olimov Kh.K., Fedosimova A., Lebedev I., Liu F. Analysis of Midrapidity Distributions of Identified Charged Particles in Pb + Pb Collisions at = 5.02 TeV Using Tsallis Distribution with Embedded Transverse Flow // *Universe.* – 2022. – Vol. 8. – P.401.
- 23 Sangyong J. Initial state and flow physics – A theoretical overview // *Nucl. Phys. A.* – 2014. – Vol. 932. – P. 349-356.
- 24 Giacalone G., Noronha-Hostler J., Ollitrault J.Y. Relative flow fluctuations as a probe of initial state fluctuations // *Phys. Rev. C.* – 2017. – Vol. 95. – Art.No.054910.
- 25 Sarkar S., Mali P., Mukhopadhyay A. Simulation study of elliptic flow of charged hadrons produced in Au + Au collisions at energies available at the Facility for Antiproton and Ion Research // *Phys. Rev. C.* – 2017. – Vol. 95. – Art.No.014908.
- 26 Nakamura K., Miyoshi T., Nonaka Ch., Takahashi H.R. Directed flow in relativistic resistive magneto-hydrodynamic expansion for symmetric and asymmetric collision systems // *Phys. Rev. C.* – 2023. – Vol. 107. – Art.No.014901.
- 27 Bhattacharyya S. Investigation of centrality dependence of dynamical fluctuations in narrow pseudo-rapidity interval on event-by-event basis // *International Journal of Modern Physics E.* – 2020. – Vol. 29. – No.10. – Art.No.2050083.
- 28 Manna S.K., Mukhopadhyay A., Mali P. Forward-backward multiplicity correlation and event-by-event multiplicity fluctuation in nucleus-nucleus collisions at 200 AGeV // *International journal of modern physics E.* – 2021. – Vol. 30. – No.04. – Art.No.2150021.
- 29 Bhattacharyya S. Event-by-event fluctuations of maximum particle density with respect to the width of the pseudo-rapidity interval at a few A GeV/c // *EPL.* – 2020. – Vol. 131. – Art.No.42001.

- 30 Meer D. and Mohisin Khan M. Investigation of dynamical pseudorapidity fluctuations using strongly intensive quantities on event-by-event basis in nucleus–nucleus interactions at CERN SPS energies // *International Journal of Modern Physics E*. – 2023. – Vol.32. – No.01. – Art.No.2350002.
- 31 Alver B. et al. Participant and Spectator Scaling of Spectator Fragments in Au + Au and Cu + Cu Collisions at $\sqrt{S_{NN}} = 19.6$ and 22.4 GeV // *Physical Review C*. – 2016. – Vol.94. – Art.No.024903.
- 32 Bhattacharyya S., Haiduc M., Neagu A.T., Firu, E. Centrality dependence of total disintegration of target nuclei in high energy nucleus-nucleus interactions // *Canadian journal of physics*. – 2016. – Vol. 94. – P.884-893.
- 33 Fedosimova A., et al. Study of the peculiarities of multiparticle production via event-by-event analysis in asymmetric nucleus-nucleus interactions // *EPJ Web of Conf.* – 2017. – Vol. 145. – Art.No.19009.
- 34 Kurepin A., Topilskaya N. Heavy-ion collisions in a fixed target mode at the LHC beams // *EPJ Web of Conferences*. – 2017. – Vol. 138. – Art.No.03009.
- 35 Lebedev I., Fedosimova A., Mayorov A., Krassovitskiy P., Dmitriyeva E., Ibraimova S., Bondar E. Direct Measurements of Cosmic Rays (TeV and beyond) Using an Ultrathin Calorimeter: Lessening Fluctuation Method // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol.11 (23). – Art.No.11189.
- 36 Dmitriyeva E. et al. Determination of the primary energy using an ultrathin calorimeter // *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* – 2020. – Vol.47. – Art.No.035202.
- 37 Fedosimova A., Lebedev I., Mayorov A. Application of ASAS method to PAMELA calorimeter // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 2155. – Art.No.012001.
- 38 Fedosimova A., Kharchevnikov, Lebedev I., Temiraliev A. Applying universality in the development of cascade processes for the research of high energy cosmic particles in space experiments // *EPJ Web of Conferences*. – 2017. – Vol.145. – Art.No.10004.
- 39 Hurst H.E., Black R.P., Simaika Y.M. Long term storage, an experimental study. – London: Constable, 1965.
- 40 Tuan N.H., Caraballo T., Thach T.N. Continuity with respect to the Hurst parameter of solutions to stochastic evolution equations driven by H-valued fractional Brownian motion // *Applied Mathematics Letters*. – 2023. – Vol.144. – Art.No.108715.
- 41 Yan Y., Xin Z., Bai X., et al. Analysis of Growing Season Normalized Difference Vegetation Index Variation and Its Influencing Factors on the Mongolian Plateau Based on Google Earth Engine // *Plants*. – 2023. – Vol.12 (13). – Art.No.2550.
- 42 Marin-Lopez A., Martínez-Cadena J.A., Martínez-Martínez F., Álvarez-Ramírez J. Surrogate multivariate Hurst exponent analysis of gait dynamics // *Chaos, Solitons and Fractals*. – 2023. – Vol.172. – Art.No.113605.
- 43 Lebedev I. A., Shaikhatdenov B. G. The use of the Hurst method for rapidity correlation analysis // *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*. – 1997. – Vol.23. – P.637.
- 44 Adamovich M.I. et al. Fragmentation and multifragmentation of 10.6 AGeV gold nuclei // *Eur. Phys. J. A*. – 1999. – Vol.5. – P.429–440.
- 45 Adamovich M.I. et al. Flow effects in high-energy nucleus collisions with Ag(Br) in emulsion // *Physics of atomic nuclei*. – 2004. – Vol.2. – P.273-280.
- 46 Adamovich M.I. et al. Factorial Moments of ^{28}Si Induced Interactions with Ag(Br) Nuclei // *APH N.S. Heavy Ion Physics*. – 2001. – Vol.13. – P.213–221.
- 47 Feder J. *Fractals*. – New York: Plenum Press, 1988.
- 48 Kvochkina T.N., et al. An analysis of high-energy interactions with large transverse momentum of secondary particles // *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*. – 2000. – Vol.26. – P.35–41.

References

- 1 E. Shuryak, *Reviews of modern physics* 89, 035001 (2017).
- 2 ALICE Collaboration, B. Abelev et al., *Physics Letters B* 720, 52–62 (2013).
- 3 Kh.K. Olimov, I.A. Lebedev, et al., *Eur. Phys. J. Plus* 138, 414 (2023).
- 4 K.K. Olimov et al., *International journal of modern physics E* 30, 2150029 (2021).
- 5 S. Acharya, D. Adamova et al., *Physical Review Letters* 125, 022301 (2020).
- 6 T. Ablyazimov et al., *European physical journal A* 53, 60 (2017).
- 7 K.A. Bugaev et al., *European physical journal A* 52, 175 (2016).
- 8 L. Adamczyk et al., (STAR Collaboration) *Phys. Rev. C* 96, 044904 (2017).
- 9 Larionova, D.M. et al, *Physics of Particles and Nuclei* 54, 380-383 (2023).
- 10 F.W. Bopp et al., *Acta Physica Polonica Series B* 35, 303–307 (2004).
- 11 A. Capella et al., *Physics Reports* 236, 225-329 (1994).
- 12 K. Kuroki, A. Sakai, K. Murase and T. Hirano, *Physics Letters, Section B* 842, 137958 (2023).
- 13 A. Golubtsova, N. Tsegelnik, *Physical Review D* 107, 106017 (2022).
- 14 S. Somorendro, M. Jena, K.K. Gupta and G. Saxena, *Indian Journal of Physics*, 97, 1543-1550 (2023).
- 15 M. Gazdzicki, M.I. Gorenstein and S. Mrowczynski, *Physics letters B* 585, 115-121 (2004).
- 16 K. Weiyao and I.Vitev, *PHYSICAL REVIEW C* 107, 064903 (2023).
- 17 K. Nakamura, T. Miyoshi, Ch. Nonaka and H.R. Takahashi, *Phys. Rev. C* 107, 034912 (2023).
- 18 I. Lebedev, N. Burtebayev, et.al, *Acta Physica Polonica B* 14, 673 (2021).

- 19 R.S. Bhalerao, M. Luzum and J.Y. Ollitrault, *Physical review C* 84, 034910 (2011).
- 20 F.G. Gardim, G. Giacalone, M. Luzum and J.Y. Ollitrault, *Nuclear physics A* 1005, 121999 (2021).
- 21 A. Fedosimova et al., *Journal of Physics Conference Series* 668, 012067 (2016).
- 22 Kh.K. Olimov, A. Fedosimova, I. Lebedev, F. Liu, *Universe* 8, 401 (2022).
- 23 J. Sangyong, *Nuclear Physics A* 932, 349-356 (2014).
- 24 G. Giacalone, J. Noronha-Hostler and J.Y. Ollitrault, *Phys. Rev. C* 95, 054910 (2017).
- 25 S. Sarkar, P. Mali and A. Mukhopadhyay, *Phys. Rev. C* 95, 014908 (2017).
- 26 K. Nakamura, T. Miyoshi, Ch. Nonaka, and H.R. Takahashi, *Phys. Rev. C* 107, 014901 (2023).
- 27 S. Bhattacharyya, *International Journal of Modern Physics E* 29, 2050083 (2020).
- 28 S.K. Manna, A. Mukhopadhyay and P. Mali, *International journal of modern physics E* 30, 2150021 (2021).
- 29 S. Bhattacharyya, *EPL* 131, 42001 (2020).
- 30 D. Meer and M. Mohisin Khan, *International Journal of Modern Physics E* 32, 2350002 (2023).
- 31 B. Alver et al., *Physical Review C* 94, 024903 (2016).
- 32 S. Bhattacharyya, M. Haiduc, A.T. Neagu and E. Firtu, *Canadian journal of physics* 94, 884-893 (2016).
- 33 A. Fedosimova, et al., *EPJ Web of Conf.* 145, 19009 (2017).
- 34 A. Kurepin and N. Topilskaya, *EPJ Web of Conferences* 138, 03009 (2017).
- 35 I. Lebedev, et al., *Applied Sciences* 11, 11189 (2021).
- 36 E. Dmitrieva et al., *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 47, 035202 (2020).
- 37 A. Fedosimova et al., *Journal of Physics: Conference Series* 2155, 012001 (2022).
- 38 A. Fedosimova, et.al., *EPJ Web of Conferences* 145, 10004 (2017).
- 39 H.E. Hurst, et.al., *Long-Term Storage: An Experimental Study* (Constable, Environmental Science, London, 1965), 145 p.
- 40 N.H. Tuan, T. Caraballo and T.N. Thach, *Applied Mathematics Letters* 144, 108715 (2023).
- 41 Y. Yan, Z. Xin, X. Bai et al, *Plants* 12, 2550 (2023).
- 42 A. Marin-Lopez, J.A. Martínez-Cadena, F. Martínez-Martínez and J. Alvarez-Ramírez, *Chaos, Solitons and Fractals* 172, 113605 (2023).
- 43 I.A. Lebedev and B.G. Shaikhatdenov, *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* 23, 637, (1997).
- 44 M.I. Adamovich et al., *Eur. Phys. J. A.* 5, 429–440 (1999).
- 45 M.I. Adamovich et al., *Physics of atomic nuclei* 2, 273-280 (2004).
- 46 M.I. Adamovich et al., *Acta Physica Hungarica A Heavy Ion Physics* 13, 213–221 (2001).
- 47 J. Feder, *Fractals* (Department of Physics, University of Oslo, Plenum Press, New York, 1988), 326 p.
- 48 T.N. Kvochkina et al., *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* 26, 35–41 (2000).