Manifestation of nuclear effects in fractal analysis of $AMPT AuAu$ events at 200 GeV using $SePaC$ method

Проявление ядерных эффектов при фрактальном анализе $AMPT\ AuAu$ событий при энергии 200 ГэВ $SePaC$-методом

T. Dedovich[a,b,1], *M. Tokarev*[b,2]

Т.Г. Дедович[a,b,1], *М.В. Токарев*[b,2]

[a] Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980, Moscow Region, Russia
[a] Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна, 141980, Московская обл., Россия
[b] Dubna State University, Dubna, 141980, Moscow Region, Russia
[b] Государственный университет «Дубна», Дубна, 141980, Московская обл., Россия

В работе исследовалось проявление ядерных эффектов во фрактальном анализе монте-карло $AMPT\ AuAu$ событий при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ. Поперечные импульсы p_t отрицательно заряженных частиц в пяти классах центральности анализировались $SePaC$-методом. Установлено, что выделенные фрактальные события имеют сложный p_t-спектр, а спектр нефрактальных событий аппроксимируется экспонентой в области от 2 до 4 ГэВ/с и имеет одинаковый наклон для событий в диапазоне центральности (0–30)%. Отключение взаимодействия в конечном состоянии и ядерного затенения нарушает постоянство наклона спектра. Рождение кварковых «back-to-back» струй приводит к увеличивает наклон p_t-спектра нефрактальных событий и выхода отрицательно заряженных адронов в области 2,2–3,0 ГэВ/с во фрактальных событиях. Рождение кварк-антикварковых струй в сопровождении пионов не изменяет поведение p_t-спектров фрактальных событий, но уменьшает наклон спектра нефрактальных событий в периферических столкновениях.

In this work, the manifestation of nuclear effects in the fractal Monte Carlo analysis of AMPT $AuAu$ events at the energy $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV was investigated. Transverse momenta of p_t negatively charged particles in five centrality classes were analyzed by $SePaC$ method. It was found that the selected fractal events have a complex p_t spectrum, and the spectrum of non-fractal events is approximated by an exponent in range $p_t = 2 - 4$ GeV/c. The slope parameter has the same value for non-fractal events with a centrality of (0-30)%. When the final state interaction and nuclear shadowing are disabled, the universality of the spectrum slope is disrupted. The production of quark «back-to-back» jets leads to an increase in the yield of negatively charged hadrons in range 2.2–3.0 GeV/c in fractal events and increases the slope of the p_t spectrum of non-fractal events. The production of quark-antiquark jets accompanied by pions does not change the behavior of the p_t spectra of fractal events, but reduces the slope of the spectrum of non-fractal events in peripheral collisions.

[1]E-mail: tdedovich@jinr.ru
[2]E-mail: tokarev@jinr.ru
[1]E-mail: tdedovich@jinr.ru(русский вариант)
[2]E-mail: tokarev@jinr.ru(русский вариант)

PACS: 44.25.+f; 44.90.+c

Введение

Поиск экстремальных явлений, связанных с изменениями состояния ядерной материи, является одной из задач современной физики высоких энергий. Вблизи фазовых переходов наблюдается скейлинговое, характерное для фракталов, поведение различных характеристик вещества. В работе [1] изучена перемежаемость (фрактальность) идентифицированных заряженных адронов в диапазоне псевдобыстрот $|\eta| < 0,5$ и поперечного импульса $0,2 < p_t < 2,0$ ГэВ/с. Данные получены в эксперименте STAR на RHIC во взаимодействиях $AuAu$ в диапазоне энергий $\sqrt{s_{NN}}$ от 7,7 до 200 ГэВ. Показано, что факториальные моменты $F_q(M)$ порядка q имеют степенное поведение $F_q(M) \propto F_2(M)^{\beta_q}$ в зависимости от момента второго порядка $F_2(M)$, где M определяет количество ячеек в фазовом пространстве. Изучена зависимость $\beta_q \propto (1-q)^{\nu}$ и установлено немонотонное поведение ν от энергии в центральных событиях.

В даной работе изучается фрактальность распределения частиц по поперечному импульсу в событиях, полученных при помощи монте-карло генератора $AMPT$ (A Multi-Phase Transport model for Heavy Ion Collisions) [2]. Анализ проводился $SePaC$-методом [3], позволяющим разделить события на фрактальные и нефрактальные, а также изучать их свойства. В работе исследовано влияние ядерных эффектов (взаимодействия в конечном состоянии, ядерного затенения, рождение узких противоположно направленных струй и кварк-антикварковых струй в сопровождении пионов) на результаты фрактального анализа $AuAu$ событий с энергией $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ.

1. Фракталы и $SePaC$-метод

Фракталы являются самоподобными объектами, у которых фрактальная размерность D_F не совпадает с топологической D_T. Для определения D_F вводится мера Хаусдорфа $M_\delta = \lim_{\epsilon\to 0} \inf_K \sum_{i=1}^{N} l_i^\delta$, где N количество пробников размера $l_i \leq \epsilon$, покрывающих изучаемый объект [4]. Рассматриваются все возможные покрытия K, в том числе, имеющие пробники с различными размерами. Такой подход учитывает различные способы формирования фракталов (например, с независимым [3] и зависимым делением частей [5]). Оператор inf означает, что выбирается покрытие при котором мера M_δ имеет минимальное значение. Размерность D_F определяется как значение δ, при котором мера Хаусдорфа имеет конечное значение.

$SePaC$-метод основан на определении размерности Хаусдорфа. В качестве покрытий K рассматриваются различные наборы распределений

исследуемой величины. Количество бинов в распределениях набора изменяется по степенному закону $N_b = (P_{cov})^i$ и определяет разрешение $\epsilon = 1/N_b$, на котором исследуется фрактал. Здесь P_{cov} и i - основание покрытия и номер распределения (уровень фрактала). Количество N_i элементов фракталов (пробников) на i-ом уровне и размер $l_{j,i}$ каждого j элемента определяется расположением ненулевых бинов в распределении и гипотезой (с независимым или с зависимым делением) формирования фрактала. Для определения фрактальной размерности $d_{F,i}$ уровня i, согласно определению меры Хаусдорфа, строится уравнения $\sum_{j=1}^{N_i}(l_{ji})^{d_{F,i}} = 1$. Значение $d_{F,i}$ находится численным методом «деления отрезка пополам». Событие считается фракталом с размерностью $D_F = \bar{d_F}$, если найдено покрытие K, удовлетворяющее ограничению $|d_{F,i} - \bar{d_F}|/\bar{d_F} < Dev$. Здесь $\bar{d_F}$ - среднее значение фрактальных размерностей уровней $\{d_{F,i}\}$, а Dev - параметр метода.

$SePaC$-метод имеет три параметра: P_{Max} - максимальное основание покрытий, гипотеза формирования фрактала и Dev - относительная точность фрактальных размерностей различных уровней.

2. $AMPT$-генератор и данные для анализа

В работе проводится фрактальный анализ монте-карло $AuAu$ событий при энергии $\sqrt{s_{NN}}$=200 ГэВ. Анализируются распределения по поперечному импульсу p_t отрицательно заряженных частиц, регистрируемых в интервале псевдобыстрот $|\eta| \leq 0,5$, для различных классов центральности $(0-5)\%$, $(5-10)\%$, $(10-20)\%$, $(20-30)\%$ и $(30-40)\%$. Каждый класс содержит по 30000 событий.

Генерация событий проводилась с использованием мультифазной транспортной модели $AMPT$ [2]. Множественное рождение частиц в модели рассматривается в предположении универсальности партонных плотностей, эволюция которых происходит в соответствии с уравнением $DGLAP$. Жесткие и полужесткие процессы рассчитываются в рамках $pQCD$. Мягкие взаимодействия описываются феноменологической моделью множественного рождения струн. В работе рассматривается версия генератора, используемая по умолчанию ($Default$). Энергия столкновения в начальном состоянии системы распределена между мягкими возбужденными струнами, министруями партонов и нуклонами-спектаторами. Партоны из министруй участвуют в неупругом ZPC (Zhang's parton cascade) каскаде. Этот каскад включает двухчастичные рассеяния партонов с сечениями, полученными в рамках $pQCD$ с экранирующими массами. В дальнейшем, партоны рекомбинируют с «родительскими» мягкими струнами. Полученные, в результате рекомбинации, струны преобразуются в адроны механизмом струнной фрагментации Лунда. Взаимодействие адронов в конечном состоянии, описывается релятивистской транспортной моделью ART. Каскадный процесс останавливается, когда частицы считаются стабильными.

3. Результаты фрактального анализа

В данном разделе проведено сравнение результатов фрактального анализа различных данных, полученных $AMPT$-генератором с учетом различных ядерных эффектов.

3.1 Анализ данных с $AMPT$ параметрами, выбранными по умолчанию

Опишем значения некоторых параметров, используемых по умолчанию в $AMPT$-генераторе. Во взаимодействии в конечном состоянии (FSI) количество шагов в адронном каскаде выбирается $NTMAX = 150$, а также включены опции: ядерное затенение (модификация партонной плотности в ядрах), ливни партонов в начальном и конечном состоянии и «K_t-kick» (добавление поперечного импульса K_t партону). Выключена опция рождение легких кварковых струй в сопровождении пионов.

Фрактальный анализ данных проводился $SePaC$-методом с выбранным значением параметра $Dev = 0,05$. Обоснование этого выбора приведено в работе [6]. Зависимости доли событий, восстановленных как фракталы ($Prtn$), от параметра P_{Max} для событий с центральностью $(0-5)\%$ для гипотезы независимого (красные точки) и зависимого (синие точки) деления показаны на рисунке 1,а. Из рисунка видно, что для гипотезы независимого деления доля $Prtn > 0$ при значении $P_{Max} \geq 3$. При значении $P_{Max} > 10$ значение доли выходит на плато. Такое поведение является указанием на наличие фракталов в наборе данных [7]. Для гипотезы зависимого деления доля $Prtn > 0$ при значении $P_{Max} \geq 10$, что является указанием на отсутствие фрактальных структур в наборе данных [7]. Такое поведение характерно для всех классов центральности. Поэтому, в последующем анализе используется $SePaC$-метод с гипотезой независимого деления и значением параметра $P_{Max} = 10$.

На рисунках 1,б,в представлено распределение по поперечному импульсу адронов p_t для нефрактальных и фрактальных событий с центральностью $(0-5)\%$ - красные точки, $(10-20)\%$ - синие точки и $(30-40)\%$ - зеленые точки. Установлено, что форма спектра для фрактальных и нефрактальных событий зависит от параметра Dev. Спектр для нефрактальных событий имеет экспоненциальный вид в диапазоне $2,0-4,0$ ГэВ/с (рис. 1,б). Наилучшие значения χ^2/N аппроксимации соответствует $Dev = 0,035$. Выбор величины Dev по критерию χ^2/N будем считать оптимальным. Значения параметра наклона p_t-спектра нефрактальных событий, полученного аппроксимацией экспоненциальной функцией, для различных данных приведены в таблице 1 и соответствуют $\chi^2/N < 1,3$.

Анализ данных с $AMPT$ параметрами, выбранными по умолчанию ($Default$), показал, что наклон p_t-спектра нефрактальных событий различных классов центральности в диапазоне $(0-30)\%$ имеет среднее зна-

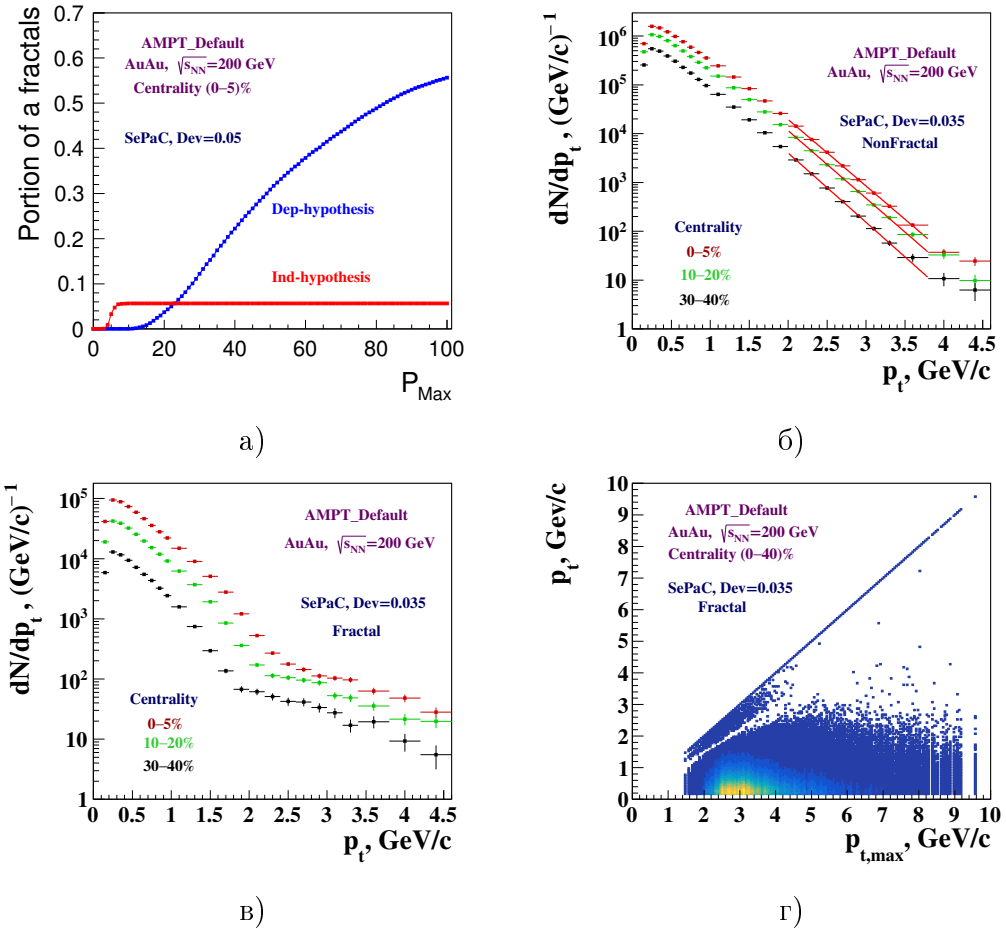

Рис. 1. Анализ данных с параметрами, выбранными по умолчанию: зависимости доли событий, восстановленных как фракталы, от параметра P_{Max} для событий с центральностью (0-5)% с использованием гипотез независимого (красные точки) и зависимого (синие точки) деления (а); распределение по p_t для нефрактальных (б) и фрактальных (в) событий с центральностью $(0-5)\%$ - красные точки, $(10-20)\%$ - синие точки и $(30-40)\%$ - зеленые точки; двумерные распределение $\{p_t; p_{t,max}\}$ фрактальных событий для всех классов центральности в диапазоне $(0-40)\%$ (г).

чение $-3,16 \pm 0,02$. Наклон для событий с центральностью $(30-40\%)$ увеличивается $(-3,26 \pm 0,03)$.

На рисунке 1,в показано распределение фрактальных событий по p_t. Видно, что наклон спектров резко уменьшаетсяс ростом p_t. Выполаживание наблюдается в области, которая зависит от центральности (2,5 ГэВ/с, 2,2 ГэВ/с и 1,8 ГэВ/с для центральностей $(0-5)\%$, $(10-20)\%$ и $(30-40)\%$, соответственно). Установлено, что доля фрактальных событий незначительно уменьшается с центральностью (от 5,7% до 2,3% для центральности $(0-5)\%$ и $(30-40)\%$, соответственно).

На рисунке 1,г приведено двумерное распределение $\{p_t; p_{t,max}\}$ фрактальных событий для различных классов центральности, где $p_{t,max}$ - максимальный импульс частицы в событии. Распределение имеет разряженную область, отделяющую лидирующие частицы от остальных. Такая особенность связана с формой p_t-спектра фрактальных событий. Для нефрактальных событий разряженная область в распределении $\{p_t; p_{t,max}\}$ отсутствует.

Анализ данных с $AMPT$ параметрами, выбранными по умолчанию, показал, что доля фрактальных событий незначительно уменьшается с центральностью, p_t-спектр фрактальных событий имеет излом, а нефрактальных - описываются экспонентой в диапазоне 2,0–4,0 ГэВ/с. Установлено, что параметры наклона для различных классов центральности в диапазоне 0–30% в пределах ошибок одинаковы.

3.2 Взаимодействие в конечном состоянии

Взаимодействие в конечном состоянии (FSI) изучалось при условии, что количество шагов в адронном каскаде $NTMAX$ равно 150 ($Default$) и 2 (эффективное выключение).

Установлено, что оптимальное значение Dev=0,1 значительно выше значения $Dev = 0,035$ для данных с параметрами по умолчанию. Увеличение Dev приводит к росту доли фрактальных событий (61,4% для центральности (0-5)%) и значительному изменению p_t-спектров.

На рисунке 2,а представлены p_t-спектры фрактальных событий с центральностью $(0-5)\%$ для данных с выключенным FSI (синие точки) и данных с параметрами по умолчанию (красные точки). Видно, что спектры событий сильно различаются. Спектр для данных с выключенным FSI монотонно убывает и в нем отсутствует выполаживание в области $p_t = 2-3$ ГэВ/с, характреное для данных с параметрами по умолчанию. Такое различие наблюдается для всех классов центральности.

В таблице 1 приведены значения параметра наклона p_t-спектра нефрактальных событий. Из таблицы видно, что наклон спектра зависит от центральности в диапазоне (0-40)% и имеет большее значение по сравнению с наклоном для данных с параметрами по умолчанию.

Таким образом, включение взаимодействия в конечном состоянии уменьшает долю фрактальных событий, приводит к выполаживанию их

p_t-спектра, а также к равенству наклонов спектров нефрактальных событий для классов центральности в диапазоне $(0-30)\%$.

3.3 «Ядерное затенение»

Эффект ядерного затенения («nuclear shadowing») изучался при включении опции, позволяющей изменять степень затенения. Выбор параметра $dshadowing = 0$ полностью выключает эффект.

Установлено, что оптимальное значение Dev и доля фрактальных событий совпадают со значениями для данных с параметрами по умолчанию. На рисунке 2,б представлены p_t-спектр фрактальных событий с центральностью (0-5)% для данных с выключенным ядерным затенением (синие точки) и данных с параметрами по умолчанию (красные точки). Из рисунка видно, что спектры отличаются незначительно.

Значения параметра наклона p_t-спектров нефрактальных событий приведен в таблице 1. Наклон спектра зависит от класса центральности в диапазоне от $(0-40)\%$ и имеет меньшее значение по сравнению с наклоном для данных с параметрами по умолчанию.

Таким образом, включение ядерного затенения не изменяет долю и поведение p_t-спектра фрактальных событий, но приводит к постоянству наклона спектра нефрактальных событий для различных классов центральности в диапазоне $(0-30)\%$.

3.4 Рождение узких противоположно направленных струй партонов

В модели рождение узких противоположно направленных («back-to-back») струй партонов получают выключением партонных ливней в начальном и конечном состоянии и эффекта K_t-kick.

Установлено, что оптимальное значение Dev и доля фрактальных событий совпадают со значениями для данных с параметрами по умолчанию. На рисунке 2,г представлены p_t-спектры фрактальных событий с центральностью $(0-5)\%$ для данных с «back-to-back» струями (синие точки) и с параметрами по умолчанию (красные точки). Из рисунка видно, что p_t-спектры фрактальных событий имеют плато в диапазоне 2,2–3,0 ГэВ/с и превышают спектр данных с параметрами по умолчанию. Это указывает на увеличение выхода отрицательно заряженных адронов в этой области. Такое поведение наблюдается для всех классов центральности.

Значения параметра наклона p_t-спектра нефрактальных событий приведены в таблице 1. Видно, что наклон одинаков для всех классов центральности в диапазоне $(0-40)\%$. Среднее значение наклона $-3,31 \pm 0,04$ превышает значение для данных с параметрами по умолчанию $-3,16 \pm 0,02$ в диапазоне $(0-30)\%$.

Таким образом, рождение «back-to-back» струй не изменяет долю фрактальных событий, но приводит к увеличению выхода отрицательно заряженных адронов в области 2,2–3,0 ГэВ/с. Параметр наклона p_t-спектра нефрактальных событий увеличивается и одинаков для всех классов центральности.

3.5 Рождение кварковых струй в сопровождении пионов

В работе рассматривались события с опцией - рождения кварковых струй в сопровождении пионов. Энергии кварков (7 ГэВ) и пионов (5 ГэВ) являются свободными параметрами.

Установлено, что оптимальное значение Dev и доля фрактальных событий совпадают со значениями для данных с параметрами по умолчанию. На рисунке 2,г представлены p_t-спектры фрактальных событий с центральностью $(0-5)\%$ для данных с рождением кварк-антикварковых струй в сопровождении пионов (синие точки), а также данных с параметрами по умолчанию (красные точки). Видно, что p_t-спектры фрактальных событий отличаются незначительно. Такое поведение наблюдается для всех центральностей.

Значения параметра наклона p_t-спектра нефрактальных событий приведены в таблице 1. Наклоны для всех классов центральности в диапазоне $(0-40)\%$ одинаковы. Среднее значением наклона $-3,16 \pm 0,03$ совпадает со значение для данных с параметрами по умолчанию в диапазоне $(0-30)\%$.

Таким образом, рождение квар-антикварковых струй в сопровождении пионов не изменяет долю и поведение p_t-спектров фрактальных событий. Наклон спектра нефрактальных событий совпадает с наклоном для данных с параметрами по умолчанию, а постоянство наклона выполняется для всех классов центральности в диапазоне $(0-40)\%$.

Заключение

В работе представлены результаты изучения ядерных эффектов во фрактальном анализе монте-карло $AuAu$ событий при энергии $\sqrt{s}_{NN} =$ 200 ГэВ/с. Данные получены с помощью $AMPT$-генератора. Разделение на фрактальные и нефрактальные события проведено $SePaC$-методом.

Показано, что доля фрактальных событий с $AMPT$ параметрами по умолчанию незначительно уменьшается с центральностью, p_t-спектр фрактальных событий имеет излом, а нефрактальных - описываются экспонентой в диапазоне 2,0–4,0 ГэВ/с. Установлено, что параметры наклона для различных классов центральности в диапазоне 0–30% в пределах ошибок одинаковы.

Включение взаимодействия в конечном состоянии уменьшает долю фрактальных событий, приводит к выполаживанию их p_t-спектра, а также к равенству наклонов спектров нефрактальных событий для классов центральности в диапазоне $(0-30)\%$.

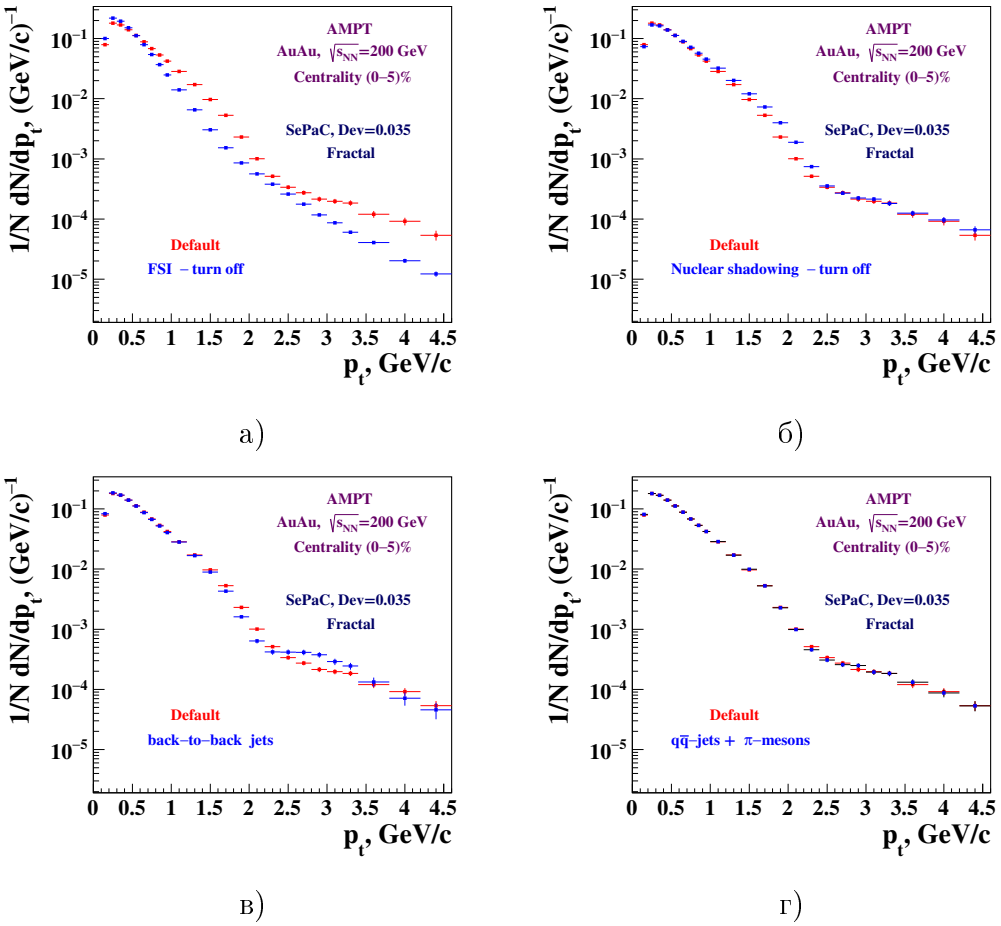

Рис. 2. p_t-спектры фрактальных событий для данных с параметрами по умолчанию «Default», выключенным взаимодействием в конечном состоянии «FSI - turn off» (а) и ядерным затенением «Nuclear shadowing - turn off» (б), а также для данных с включенными узкими струями «back-to-back jets» (в) и рождением кварк-антикварковых струй в сопровождении пионов «$q\bar{q}$-jets + π-meson» (г)

Эффект «ядерного затенения» не изменяет долю и поведение p_t-спектра фрактальных событий, а также приводит к постоянству наклона спектра нефрактальных событий для различных классов центральности в диапазоне $(0-30)\%$.

Рождение кварковых «back-to-back» струй не изменяет долю фрактальных событий, но приводит к увеличению выхода отрицательно заряженных адронов в области 2,2–3,0 ГэВ/с. Параметр наклона p_t-спектра нефрактальных событий увеличивается и одинаков для всех классов центральности.

Рождение квар-антикварковых струй в сопровождении пионов не изменяет долю и поведение p_t-спектров фрактальных событий. Наклон спектра нефрактальных событий постоянен для всех классов центральности в диапазоне $(0-40)\%$ и совпадает с наклоном для данных с параметрами по умолчанию.

Финансирование работы Данная работа финансировалась за счет средств бюджета института (учреждения, организации). Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Таблица 1. Наклон p_t-спектра нефрактальных $AMPT$ $AuAu$ событий для разных классов центральности при энергии $\sqrt{s_{NN}}$=200 ГэВ и $|\eta| \leq 0,5$.

Классы центральности	Наклон p_t-спектра нефрактальных событий				
	Default parameters	FSI turn off	Nuclear shadowing turn off	back-to-back jets	$q\bar{q}$–jets + π-meson
$(0-5)\%$	-3.14 ± 0.02	-4.04 ± 0.07	-2.92 ± 0.02	-3.29 ± 0.03	-3.14±0.02
$(5-10)\%$	-3.18 ± 0.02	-3.85 ± 0.09	-2.94 ± 0.02	-3.30 ± 0.03	-3.16 ± 0.02
$(10-20)\%$	-3.19 ± 0.03	-3.77 ± 0.09	-3.00 ± 0.02	-3.29 ± 0.03	-3.16 ± 0.03
$(20-30)\%$	-3.15 ± 0.04	-3.82 ± 0.11	-3.03 ± 0.03	-3.32 ± 0.05	-3.16 ± 0.04
$(30-40)\%$	-3.26 ± 0.03	-3.65 ± 0.12	-3.06 ± 0.04	-3.32 ± 0.06	-3.16 ± 0.05

Список литературы

1. *Abdulhamid M.I. et al.* Energy Dependence of Intermittency for Charged Hadrons in Au+Au Collisions at RHIC // Phys. Lett. B — 2023. — V. 845 — P. 138165-138176 — arXiv:2301.11062v2.

2. *Lin Z.W. et al.* A Multi-phase transport model for relativistic heavy ion collisions // Phys.Rev.C — 2005. — V. 72 — P. 064901-064934

3. *Dedovich T.G, Tokarev M.V.* Method of Systems of Equations of P-Adic Coverages for Fractal Analysis of Event // Phys. Part. Nuclei Lett. — 2012. — V. 9 — P. 552-566

4. *Hausdorff F.* Dimension und äußeres Maß // Math. Ann — 1918. — V. 79 — P. 157-179.

5. *Dedovich T.G, Tokarev M.V.* Analysis of fractals with dependent branching by box counting, P-adic coverages, and systems of equations of P-adic coverages. // Phys. Part. Nuclei Lett. — 2013. — V. 10 — P. 491-500

6. *Dedovich T.G., Tokarev M.V.* Criteria of Fractal Reconstruction and Suppressing Background Events with the SePaC Methods // Phys. Part. Nucl. Lett. — 2021. — V. 18. no.1 — P. 93–106.

7. *Dedovich T.G., Tokarev M.V.* Fractal Reconstruction in the Presence of Background // Phys. Part. Nucl. Lett. — 2017. — V. 14. no.6 — P. 865–873.