

## Отзыв официального оппонента

доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника ИЯИ РАН Пантуева Владислава Сергеевича на диссертационную работу Апарина Алексея Андреевича **"скейлинговые закономерности в рождении кумулятивных частиц и частиц с большими поперечными импульсами в протон ядерных столкновениях при высоких энергиях"**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Диссертационная работа посвящена поиску сигнатур возможного фазового перехода в процессах инклюзивного рождения кумулятивных частиц и частиц с большими поперечными импульсами ( $p_T$ ) в протон-ядерных соударениях. Цель работы – проведение анализа экспериментальных данных, полученных в ИФВЭ и ФНАЛ, по кумулятивному рождению частиц в протон-ядерных взаимодействиях с большими и малыми поперечными импульсами при высоких энергиях в рамках подхода  $z$ -скейлинга, сравнение результатов с полученными ранее для рождения частиц в некумулятивной области с большими  $p_T$ .

Поиск новых скейлинговых закономерностей всегда был предметом интенсивных исследований при изучении взаимодействий частиц и ядер высоких энергий. Нарушения симметрий и отклонения от скейлингового поведения соответствующих характеристик, рассматриваются как проявления новых физических закономерностей. Метод  $z$ -скейлинга позволяет обойтись минимальным набором параметров для описания рождения частиц в широкой области кинематических и динамических переменных.

В работе продемонстрирована применимость метода  $z$ -скейлинга к специальному классу рождения частиц – к кумулятивному рождению на примере заряженных частиц в экспериментах на фиксированной мишени. Показано, что возможно описывать кумулятивное рождение в столкновениях протонов с ядрами в тех же переменных, что и поведение некумулятивных частиц.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и двух приложений. Содержит 29 рисунков и 4 таблицы. Список использованной литературы содержит 172 наименований.

**Во введении** обосновывается актуальность выбранной темы, формулируются цели и задачи диссертационной работы, описывается научная новизна и научно-практическая ценность работы. Приводятся основные защищаемые положения, список публикаций по теме исследования и апробации диссертационной работы.

**В первой главе** содержится краткий обзор литературы по изучаемой проблематике масштабной инвариантности и кумулятивных процессов в физике высоких энергий. Дано определение кумулятивных процессов и приведен способ их выделения из набора фоновых событий. Представлено краткое описание различных скейлингов, установленные в физике высоких энергий (скейлинги Бьеркена, Фейнмана, правила кваркового счета, ядерный скейлинг в кумулятивной рождении и др.), эксперименты по их открытию и границы их применимости.

**Во второй главе** изложен общий формализм метода z-скейлинга для анализа инклюзивных спектров рождения адронов в столкновениях адронов и ядер. Основная идея данного метода базируется на предположении В.Ставинского, что при высокой энергии рождение инклюзивной частицы в столкновении адронов или ядер может быть описано в терминах динамических характеристик элементарного подпроцесса. Предполагается, что для рассматриваемого канала рождения частицы выполняются законы сохранения импульса, электрического, барионного зарядов, странности и др.

Приведено описание подхода и его связь с фундаментальными физическими принципами (самоподобия, локальности и фрактальности), заложенными в основу метода z-скейлинга. Описана процедура построения скейлинговой переменной  $z$  и скейлинговой функции  $\Psi(z)$ . Приведены их свойства и их физическая интерпретация.

**В третьей главе** описаны основные результаты анализа спектров рождения пионов и заряженных адронов в некумулятивной области с большими поперечными импульсами в  $p+A$  столкновениях, полученных на ускорителях ФНАЛ и У70. Эксперименты были выполнены с неподвижной мишенью при импульсах налетающего протона  $p_L = 70, 200, 300, 400$  и  $800$  ГэВ/с. Использовались различные ядерные мишени, от дейтерия до свинца. Приведены данные по зависимости



функции  $\Psi(z)$  от атомного номера ядра мишени в этих экспериментах. Было установлено, в частности, что для пионов наблюдается скейлинговое поведение, если фрактальная размерность ядер «delta» аддитивна относительно фрактальной размерности нуклона. Получена массовая зависимость скейлинговой функции.

**В четвертой главе** приведены результаты анализа данных кумулятивного рождения пионов с малыми поперечными импульсами в эксперименте на ускорителе ФНАЛ, а также на У70 с большими и малыми поперечными импульсами. Отдельно рассмотрено рождение заряженных адронов на У70 в ИФВЭ. Данные приведены в двух видах: зависимости сечения от импульса и зависимости функции  $\Psi$  от переменной  $z$ . Описаны найденные закономерности в  $z$ -представлении спектров - самоподобие формы скейлинговой кривой. Подтверждены универсальность и энергетическая независимость формы скейлинговой функции.

Результаты проведенного исследования по проверке  $z$ -скейлинга по инклюзивным сечениям рождения заряженных адронов не выявили сигнатур фазовых переходов в исследованных кинематических областях.

**В пятой главе** сделано предсказание поведения импульсных спектров заряженных адронов на основе универсальности формы скейлинговой функции  $\Psi(z)$ . Задача сводилась к выбору аналитической формы фитирующей функции, которая бы точно воспроизводила форму скейлинговой функции в широком диапазоне по  $z$ . Показано, что наилучшей функцией является функция Цаллиса, предложенная в 1988 году Константино Цаллисом, как обобщение теории Больцмана-Гиббса. Подробнее от этой функции рассказано в Приложении Б. Приведены значения параметров фитирующей функции. Предсказаны величины инвариантных сечений рождения пионов и заряженных адронов в широком диапазоне импульсов.

**В шестой главе** сформулировано предложение к проведению исследования поведения частиц, рожденных от фрагментации мишени, в эксперименте с фиксированной мишенью на детекторе STAR при энергии столкновения в системе центра масс 9.2 ГэВ, что эквивалентно энергии пучков по 4.6 ГэВ. Приведены расчеты кинематических характеристик рождения вторичных частиц при различных начальных условиях. Приведено расширение модели  $z$ -скейлинга на случай столкновения тяжелых ионов. Показано преимущество изучения рождения кумулятивных частиц в заднюю полусферу с целью поиска сигнатур фазовых переходов.

**В заключении** сформулированы основные физические и методические результаты диссертационной работы.

Необходимо отметить, что работа содержит недостатки:

1. Глава 2, в которой описывается предлагаемый подход, написана весьма схематично. В ходе конструирования модели z-скейлинга и соответствующей скейлинговой функции развивается некий математический аппарат, который сам по себе носит алгебраическую форму. Однако не в полной мере объяснено на основании чего сделаны те или иные предположения и допуски. Описание носит декларативный характер. При этом следует учесть, что методика поиска и построения скейлинговых закономерностей для инклюзивных реакций стоит в стороне от общепринятых в мировой практике построения моделей рождения частиц. Поэтому, это требует весьма тщательной продуманной аргументации при описании всех предположений модели. Например, всем известно, что в процессах с большими передачами импульса реакции проходят на уровне кварков и глюонов с участием соответствующих структурных функций нуклона. Наблюдаемые частицы, в частности пионы, в большей своей части являются продуктами распадов мезонных и барионных резонансов. В предлагаемой модели, фактически, дается некий рецепт свертки по всем внутренним подпроцессам. Да, скейлинг работает, но затруднительно просто на слово принимать предлагаемые формулы и расчеты.
2. Весьма слаба физическая интерпретация некоторых предлагаемых переменных: фрактальная мера и обоснование введения её параметров «дельта», использование некоторых разложений и преобразований. Например, на стр. 43 (формулы 2.11-2-15) совершенно не ясно зачем делается переход к переменным хи, омега, лямбда, альфа. Нет объяснения или ссылки на введение этого формализма.
3. Повсеместно при описании фрактальности или экспериментального разрешения подпроцесса (Омега) используется основополагающий параметр «дельта» (формулы 2.6, 2.20, а также по ходу вычислений). Однако нигде в тексте не указано, чему он соответствует: отрицателен, положителен, меньше или больше единицы. Его значение для нуклона, для мезона?
4. В Главе 6 о применении модели к ядро-ядерным соударениям на RHIC имеется внутреннее противоречие. Исследование ядро-ядерных столкновений на RHIC (по крайней мере при энергиях соударения выше 39



ГэВ) показало возможное образование нового состояния вещества сильно взаимодействующей кварк-глюонной плазмы. В наибольшей степени эффект проявляется в подавлении выхода частиц с большими поперечными импульсами. Вот где поле действительно проверить работу скейлинга. Однако на стр. 92 в параграфе 6.3 отмечено, что поведение модельных параметров используемого подхода может быть «смазано» как раз потерями энергии конститuentов в образовавшейся среде. То есть, фактически, сказано, что модель здесь не работает. Объяснением служит указание, что измеряемые частицы не являются кумулятивными при этих высоких энергиях. Вместо этого предлагается существенно уменьшить энергию пучков до 4.6 ГэВ и даже меньше. Однако уже имеющиеся данных показывают, что эффект подавления струй, следовательно, и образование нового вещества, пропадает даже при более высоких энергиях.

5. Из менее значимых недостатков следует отметить: что такое «t» в формуле 2.4?
6. Как уже отмечалось, понимание формулы 2.6 сильно затруднено из-за отсутствия информации о конкретных значениях фрактальности «дельта».
7. О какой множественности идет речь в формулах 2.7 и 2.8 – полной множественности или данного типа частиц?
8. На многих рисунках, например, на Рис. 4.2 символы не читаемы.
9. Следовало бы на рисунках, таких как Рис. 4.4, при оценке параметров  $x_1$  и  $x_2$  указать начало области кумуляции и ее аналог с учетом Ферми движения нуклонов в ядре.
10. На стр. 63 указано, что на Рис. 4.7 данные для положительных и отрицательных пионов с высокой точностью описываются одной кривой. Однако, при внимательном рассмотрении видно, что для отрицательных пионов кривые выше. Что вполне объясняется наличием большего числа нейтронов в ядрах мишени. Отсюда возникает вопрос – нейтроны и протоны в данной модели рассматриваются идентично?
11. В параграфе 4.4 рассматриваются заряженные адроны. Однако, в их состав входят пионы, каоны, протоны и антипротоны. Как был сделан переход для учета этого факта? Как считались соответствующие  $x_1$  и  $x_2$ ? С заряженными адронами ситуация обратна – на Рис. 4.10 видно, что положительно заряженных частиц больше, что связано, скорее всего, с наличием протонов.

12. Работа содержит досадную опечатку, которая перешла и в автореферат: в перечне **Цели исследования**, стр. 9 и стр. 10 (стр. 2 автореферата) вместо аббревиатуры ИФВЭ указан ИТЭФ.

Высказанные замечания относятся к содержанию рукописи и ни в коей мере не снижают собственно ценности проделанной обширной работы. Все защищаемые положения справедливы. Данная работа содержит новые важные результаты, которые были опубликованы в журналах из списка рекомендованных ВАК для опубликования результатов представляемых на защиту диссертаций. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Считаю, что работа Апарина А.А. полностью соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Апарин А.А. заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по заявленной специальности 01.04.16 – физика ядра и элементарных частиц.

Доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник,  
Отдела экспериментальной физики,  
Пантуев Владислав Сергеевич



ФГБУН Институт ядерных исследований Российской академии наук,  
117312, Москва, В-312, проспект 60-летия Октября, 7а  
Телефон: 8(495)850-42-52  
E-mail: pantuev@inr.ru

Подпись Пантуева Владислава Сергеевича заверяю

Заместитель директора по научной работе

ФГБУН Институт ядерных исследований  
Российской академии наук  
Рубцов Григорий Игоревич

