

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор НИЦ

«Курчатовский институт» – ИТЭФ

В.Ю. Егорычев

« 21 » сентября 2017 г.



ОТЗЫВ  
ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

о диссертационной работе Апарина Алексея Андреевича «Скейлинговые закономерности в рождении кумулятивных частиц и частиц с большими поперечными импульсами в протон-ядерных взаимодействиях при высоких энергиях», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

Диссертационная работа посвящена исследованию самоподобия в рождении заряженных кумулятивных частиц и частиц с большими поперечными импульсами в столкновениях протонов с ядрами при высоких энергиях. Цель работы – проведение анализа экспериментальных данных (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 поперечными импульсами.

**Актуальность темы диссертационной работы:**

Актуальность выбранной темы диссертационной работы не вызывает сомнений, так как поиск новых симметрий и скейлинговых закономерностей всегда был предметом интенсивных исследований при изучении взаимодействий частиц и ядер высоких энергий. Одна из закономерностей, установленная в рождении нейтральных и заряженных адронов, фотонов и струй с большими поперечными импульсами при взаимодействии (анти-)протонов и ядер высоких энергий, получила название  $z$ -скейлинга. Нарушение  $z$ -скейлинга при высоких энергиях и больших поперечных импульсах предлагается рассматривать как указание на возможность существования новых физических процессов или закономерностей, таких как фазовые переходы в адронной и ядерной материи, структурность кварков, фрактальность пространства и времени, новые виды взаимодействий. В диссертационной работе в рамках  $z$ -скейлинга проведен систематический анализ данных по инклюзивному рождению заряженных частиц в  $p+A$  столкновениях при высоких энергиях в кумулятивной области при малых и больших поперечных импульсах. Проверена гипотеза самоподобия в кумулятивном рождении пионов и расширена область применимости метода с целью поиска сигнатур фазовых переходов в ядерной материи. Также в работе был предложен оригинальный анализ комбинированного набора экспериментальных данных по инклюзивным сечениям рождения частиц в  $p+A$  взаимодействиях в кумулятивной и некумулятивной областях. В результате была сделана параметризация скейлинговой функции  $\Psi(z)$  в виде распределения Цаллиса и получены предсказания зависимости сечений инклюзивных частиц для расширенной области импульсов в кинематике исследованных экспериментов.

Одним из практических выходов данной диссертационной работы является экспериментальное предложение по использованию жёстких кумулятивных процессов

рождения частиц в столкновениях тяжёлых ионов на установке STAR с целью поиска сигнатур фазовых переходов.

### **Оформление диссертационной работы:**

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, двух приложений и списка литературы. Объем диссертации составляет 119 страниц и содержит 29 рисунков и 4 таблицы. Список литературы включает 172 наименования.

**Во введении** обосновывается актуальность выбранной темы, формулируются цели и задачи диссертационной работы, описывается научная новизна и научно-практическая ценность работы.

**В первой главе** содержится краткий обзор литературы по изучаемой проблематике масштабной инвариантности и кумулятивных процессов в физике высоких энергий. Представлено краткое описание различных скейлингов, установленных в физике высоких энергий (скейлинги Бьеркена, Фейнмана, правила кваркового счета, ядерный скейлинг в кумулятивном рождении и др.), а также обзор экспериментов по их открытию и границы их применимости.

**Во второй главе** описан общий формализм метода  $z$ -скейлинга для анализа инклюзивных спектров рождения частиц и струй в столкновениях адронов и ядер. Дано описание подхода и его связь с фундаментальными физическими принципами (самоподобия, локальности, фрактальности), заложенными в основу метода. Приведена процедура построения скейлинговой переменной  $z$  и скейлинговой функции  $\Psi(z)$ . Рассматриваются их свойства и физическая интерпретация.

**В третьей главе** описаны основные результаты анализа спектров рождения пионов и заряженных адронов в  $p+A$  столкновениях, полученных на ускорителях ФНАЛ и U70 группами Д. Кронина, Д. Джаффе и Р. Суляева.

**В четвёртой главе** приведены результаты анализа в рамках метода  $z$ -скейлинга инклюзивных сечений, включающих область кумулятивного рождения частиц, в экспериментах с фиксированной мишенью на ускорителях ФНАЛ и U70.

**В пятой главе** на основе полученных результатов о скейлинговом поведении функции  $\Psi(z)$  проведены оригинальные расчеты и получены импульсные спектры рождения заряженных адронов в зависимости от энергии столкновения, массы ядра-мишени, импульса и угла вылета инклюзивной частицы.

**В шестой главе** сформулировано предложение о проведении исследования рождения кумулятивных частиц от фрагментации ядра, в эксперименте с фиксированной мишенью на детекторе STAR.

**В заключении** диссертации кратко перечислены, выносимые на защиту, основные результаты работы и сформулированы наиболее значимые положения, в получение которых А.А. Апарин внес определяющий вклад.

### **Практическая значимость результатов и рекомендации по использованию**

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы при решении задач релятивистской ядерной физики и физики частиц, связанных с поиском и исследованием закономерностей фазового перехода адронный газ - сильно-взаимодействующая кварк-глюонная плазма, структуры протонов и ядер на малых масштабах, механизма образования частиц, как в проводимых в настоящее время экспериментах на ускорителях U70, SPS, RHIC, LHC, так и в планируемых исследованиях на ускорительных комплексах NICA и FAIR, а также для развития и применения новых теоретических методов анализа.

Полученные в диссертации результаты вносят **вклад в систематическое изучение** скейлинговых закономерностей рождения частиц в протон-ядерных взаимодействиях и

проверку теории z-скейлинга. Продемонстрированное в диссертации согласованное описание процессов с большими поперечными импульсами в некумулятивной области и процессов кумулятивного рождения частиц с малыми и большими  $p_T$  имеет важное **значение**, так как дает дополнительные аргументы в поддержку используемого метода для широкого применения при планировании экспериментов и анализа экспериментальных данных.

**Достоверность** полученных в диссертации результатов обоснованна. Она подтверждается тем, что методы решения рассмотренных в диссертации задач базируются на современных теоретических представлениях и подходах к описанию кумулятивных процессов, которые были заложены в работах А.М. Балдина, Г.А. Лексина и В.С. Ставинского. Результаты, полученные в диссертации, развивают существующие теоретические подходы к описанию кумулятивных явлений. В работе они сравниваются с различными экспериментальными данными. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на международных конференциях, семинарах и опубликованы в реферируемых журналах (из списка журналов, рекомендованного ВАК). Всё вышеперечисленное в совокупности свидетельствует о достоверности полученных в диссертации результатов и сделанных на их основании выводов.

#### **Апробация результатов**

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах Лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина, на восьми международных конференциях и опубликованы в 10 работах (5 в трудах конференций и 5 в реферируемых журналах).

#### **Вклад автора**

Автор внес решающий вклад в получение результатов анализа в рамках метода z-скейлинга импульсных спектров рождения кумулятивных адронов в  $p+A$  столкновениях, полученных на протонном синхротроне ФНАЛ и ускорителе U70 ИФВЭ. Автор активно участвовал в обсуждении результатов исследований, подготовке и написании статей в реферируемые журналы и представлении результатов на конференциях и семинарах.

В работах, опубликованных по теме диссертации, вклад автора является определяющим. Все основные результаты диссертации получены автором лично. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы.

Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях. Автореферат правильно и полно отражает основное содержание диссертации.

#### **Замечания по работе:**

В качестве замечаний можно отметить неточность некоторых формулировок, ряд грамматических и стилистических огрехов. На странице 10 опечатка - вместо ИФВЭ, написано ИТЭФ. Некоторые рисунки (например, 3.1, 3.2) нечетки. Для приведённых в главе 5 предсказаний поведения сечений в  $p+A$  в области больших импульсов нужно было указать точность (коридор ошибок), так как сами данные описываются с некоторой точностью. Так же следовало бы уделить некоторое внимание созданному программному обеспечению. В целом, указанные недостатки не являются принципиальными и не снижают весьма высокую ценность данной диссертационной работы.

Выполненная диссертационная работа А.А. Апарина «Скейлинговые закономерности в рождении кумулятивных частиц и частиц с большими поперечными импульсами в протон-ядерных взаимодействиях при высоких энергиях», представляет собой законченное научное исследование и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Автор диссертационной работы А.А. Апарин заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц.

Отзыв подготовлен старшим научным сотрудником Лаборатории релятивистской ядерной физики НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ, к.ф.-м.н. Михайловым Константином Руслановичем.

Старший научный сотрудник  
НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ,  
кандидат физико-математических наук  
e-mail: konstantin.mikhaylov@cern.ch



Михайлов Константин Русланович

Отзыв рассмотрен и одобрен 18.09.2017 на заседании секции №3 Ученого совета ФГБУ «Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова НИЦ «Курчатовский институт».

Председатель секции №3 Ученого совета,  
начальник лаборатории  
НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ,  
доктор физико-математических наук  
тел. +7(495)127-47-42,  
e-mail: dolgolenko@itep.ru

Долголенко Анатолий Григорьевич



Секретарь секции №3 Ученого совета  
ведущий научный сотрудник  
НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ,  
доктор физико-математических наук  
e-mail: krutenk@itep.ru



Крутенкова Анна Петровна

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ)

Адрес: 117218, г. Москва, ул. Большая Черемушкинская, д. 25, тел. +7(499)123-80-93,  
+7(499)123-82-18, e-mail: director@itep.ru. Сайт организации: <http://www.itep.ru>