

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

АПАРИН  
Алексей Андреевич

СКЕЙЛИНГОВЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ В РОЖДЕНИИ  
КУМУЛЯТИВНЫХ ЧАСТИЦ И ЧАСТИЦ С БОЛЬШИМИ  
ПОПЕРЕЧНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ В ПРОТОН ЯДЕРНЫХ  
СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ

Специальность: 01.04.16. - „Физика атомного ядра и элементарных частиц“

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна - 2017

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий  
им. В.И. Векслера и А.М. Балдина  
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:

Токарев Михаил Владимирович

доктор физико-математических наук, профессор, Объединенный институт  
ядерных исследований, начальник сектора

Официальные оппоненты:

Пантуев Владислав Сергеевич доктор физико-математических наук, ФГБУН  
„Институт ядерных исследований Российской академии наук“, ведущий  
научный сотрудник

Окороков Виталий Алексеевич доктор физико-математических наук, доцент,  
Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“, профессор  
кафедры физики (№23)

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

НИИЦ „Курчатовский институт“ ФГБУ ГНЦ РФ „Институт теоретической и  
экспериментальной физики“

Защита состоится "\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2017 г. в "\_\_\_\_" часов на заседании  
диссертационного совета Д. 720.001.02 в Лаборатории физики высоких  
энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина Объединенного института  
ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛФВЭ ОИЯИ и в сети  
интернет по адресу: [http://www.info.jinr.ru/dissertation/DC\\_vblhe.htm](http://www.info.jinr.ru/dissertation/DC_vblhe.htm).

Автореферат разослан "....." ..... 2017 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук

В.А. Арефьев

## Общая характеристика работы

**Актуальность изучаемых задач.** Поиск новых симметрий и скейлинговых закономерностей всегда был предметом интенсивных исследований при изучении взаимодействий частиц и ядер высоких энергий. Как правило, их открытия (скейлинги Бьеркена, Фейнмана, правила кваркового счета, кумулятивное рождение и др.) способствовали выявлению новых свойств взаимодействий и структуры частиц, а также существенному продвижению в развитии теории сильных взаимодействий. Установленные закономерности позволили вычислить различные характеристики процессов в новых кинематических областях, тем самым продемонстрировали предсказательную силу существующих теорий. Нарушения симметрий и отклонения от скейлингового поведения соответствующих характеристик, наблюдаемые в новых экспериментально исследованных кинематических областях, рассматриваются, как правило, как проявления новых физических закономерностей. В дальнейшем они изучаются и составляют основу для последующего развития теории.

Важным шагом при изучении нового состояния ядерной материи и понимания фазовой диаграммы КХД является систематический анализ рождения частиц как функции энергии и центральности столкновения и характеристик частиц. Несмотря на огромный прогресс КХД, точное положение границ перехода адронный газ - сильновзаимодействующая Кварк-Глюонная Плазма(сКГП) и наличие гипотетической Критической Точки(КТ) в терминах температура  $T$  и барионный химический потенциал  $\mu_B$  до сих пор теоретически не установлено. Таким образом, цель экспериментальных и теоретических исследований - поиск убедительных доказательств существования фазовых переходов в ядерной материи.

Данная работа посвящена поиску сигнатур фазового перехода в процессах инклюзивного рождения кумулятивных частиц в протон-ядерных столкновениях.

Одним из методов исследования ядерной материи и свойств среды, образующейся при взаимодействии адронов и ядер является поиск нарушения закономерностей, установленных для частиц с большими поперечными импульсами и струй в элементарных лептон-адронных и адрон-адронных взаимодействиях. Одна из новых закономерностей в рождении заряженных адронов с большими поперечными импульсами при взаимодействии (анти-) протонов и ядер при высоких энергиях получила название  $z$  скейлинга [1, 2]. Проверка установленных свойств  $z$  скейлинга, их изучение при рождении нейтральных мезонов и струй в  $p(\bar{p}) + p$  взаимодействиях, а также поиск новых закономерностей в рамках этой теории представляет значительный интерес.

Изучение свойств  $z$ -скейлинга в  $p + A$  и  $A + A$  взаимодействиях проводится с целью выявления особенностей образования частиц в сложных системах и изучения влияния ядерной среды на процесс формирования частиц. Нарушение  $z$  скейлинга при высоких энергиях предлагается рассматривать как указание на возможность существования новых физических процессов или закономерностей, таких как фазовые переходы в адронной и ядерной материи, структур-

ность кварков, фрактальность пространства и времени, новые виды взаимодействий. Все перечисленное выше свидетельствует о том, что задачи поставленные и решаемые в диссертации актуальны.

**Целью исследования является:**

- Проверка принципа самоподобия в кумулятивном рождении пионов в протон-ядерных соударениях при энергиях У70 (ИФВЭ) и протонного синхротрона (ФНАЛ).
- Построение скейлинговой функции  $\Psi(z)$  и параметра подобия  $z$  для рождения адронов в кумулятивной области  $p + A$  столкновений в экспериментах с фиксированной мишенью на ускорителях У70 (ИТЭФ) и протонного синхротрона (ФНАЛ).
- Проверка скейлинговых закономерностей кумулятивного рождения пионов и заряженных адронов при высокой энергии - угловая, энергетическая и  $A$  зависимости функции  $\Psi(z)$ .
- Сравнение спектров рождения пионов в импульсном и  $z$  представлениях в некумулятивной и кумулятивной областях. Проверка универсальности формы функции  $\Psi(z)$  и аддитивности фрактальной размерности ядер.
- Предсказание импульсных спектров рождения пионов в  $p + A$  столкновениях в глубоко-кумулятивной области.
- Поиск сигнатур фазовых переходов в плотной ядерной материи в экспериментах с фиксированной мишенью на ускорителях У70 (ИТЭФ) и протонного синхротрона (ФНАЛ).
- Использование метода  $z$  скейлинга для кинематической оценки эксперимента с фиксированной мишенью на детекторе STAR, с целью установления наиболее подходящей для поиска сигнатур фазовых переходов в ядерной материи кинематики эксперимента.

**Научная новизна**

В работе впервые 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.

- Впервые построена скейлинговая функция  $\Psi(z)$  и параметр подобия  $z$  для рождения  $\pi$  мезонов в кумулятивной области в  $p + A$  взаимодействиях при энергиях У70 и протонного синхротрона ФНАЛ.
- Впервые изучены свойства  $z$ -скейлинга в кумулятивном рождении заряженных пионов в протон-ядерных взаимодействиях при импульсах протона в лабораторной системе  $p_L = 18-400$  ГэВ/с. Установлены энергетическая, угловая и  $A$  зависимости скейлинговой функции  $\Psi(z)$  в широкой области значений

параметра подобия  $z$ . Получено подтверждение самоподобия рождения пионов в исследованной области.

- Впервые на основе скейлинговых свойств функции  $\Psi(z)$ , установленных для рождения пионов в  $p + A$  столкновениях в кумулятивной и некумулятивной областях, предсказаны импульсные спектры пионов  $\pi^\pm$  с большими  $p_T$  в глубоко-кумулятивной области при энергиях U70 и протонного синхротрона ФНАЛ.
- Сформулированы критерии поиска новых явлений в кумулятивных процессах с большими  $p_T$ : нарушение закона аддитивности или резкое изменение фрактальной размерности ядер  $\delta_A$ .
- Предложена аналитическая зависимость скейлинговой функции  $\Psi(z)$  на основе универсальности ее формы в кумулятивной и некумулятивной областях  $p + A$  взаимодействий.

### **Научно-практическая ценность работы**

- На примере закономерностей в рождении пионов в  $p + A$  взаимодействиях, показана важность использования самоподобия как фундаментального физического принципа для поиска новых закономерностей в физике высоких энергий.
- Создан комплекс программ для расчета и исследования свойств скейлинговой функции  $\Psi(z)$  и параметра подобия  $z$  для рождения частиц в  $p + A$  взаимодействиях в кумулятивной и некумулятивной областях.
- Предсказанные импульсные спектры  $\pi^\pm$  мезонов в  $p + A$  могут быть использованы для планирования новых экспериментов.
- Предложена сигнатура появления новых физических закономерностей при рождении кумулятивных частиц в рамках метода  $z$  скейлинга.
- Расширена область применимости метода  $z$  скейлинга при описании рождения кумулятивных и некумулятивных адронов в  $p + A$  столкновениях.

### **Защищаемые положения**

На защиту выносятся следующие положения:

- Результаты анализа экспериментальных данных ИФВЭ и ФНАЛ по кумулятивному рождению заряженных адронов в  $p + A$  столкновениях: свойства  $z$  скейлинга в рождении заряженных адронов в  $p + A$  столкновениях в кумулятивной области (энергетическая, угловая независимость и степенное поведение скейлинговой функции при больших значениях параметра подобия  $z$ , зависимость  $\Psi$  и  $z$  от номера атомного ядра  $A$ ), свидетельствующие о самоподобии рождения адронов в ядерной среде в некумулятивной и кумулятивной областях.
- Процедура построения скейлинговой функции  $\Psi(z)$  для рождения  $\pi^\pm$  мезонов и неидентифицированных адронов в  $p + A$  взаимодействиях в широкой области кинематических переменных.
- Предсказание импульсных спектров рождения  $\pi$  мезонов и неидентифицированных адронов в  $p + A$  столкновениях в глубоко-кумулятивной области при энергиях U70 и Тэватрона.

- Предложение об использовании  $z$  скейлинга как метода поиска новых физических закономерностей при кумулятивном рождении частиц, образующихся в адрон-ядерных взаимодействиях при высоких энергиях.

### **Личный вклад автора диссертации**

Автор внес определяющий вклад в получение результатов анализа импульсных спектров рождения кумулятивных адронов в  $p + A$  столкновениях, полученных группами Г. Лексина, Л. Золина и В. Гапиенко на протонном синхротроне ФНАЛ и ускорителе U70 ИФВЭ. Им написаны программы на ROOT для анализа спектров в рамках метода  $z$ -скейлинга. Автор активно участвовал в обсуждении результатов исследований, подготовке и написании статей в реферируемые журналы и представлении результатов на конференциях и семинарах.

### **Апробация работы**

Основные результаты работы неоднократно докладывались на российских и международных научных конференциях и семинарах:

International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems, Дубна, Россия, (2012, 2014). Конференция молодых ученых и специалистов ОМУС, Дубна, Россия, (2012, 2014). Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Moscow, Russia, (2013, 2015). Hadron Structure, Slovakia, (2013, 2015). Научный семинар в Лаборатории Физики Высоких Энергий ОИЯИ, Дубна, Россия, 2013. The 2014 European school of high-energy physics (ESHEP2014), Netherlands 2014. International conference on ultrarelativistic nucleus-nucleus collisions „Quark Matter“, Germany, 2014. Конференция молодых ученых и специалистов „Алушта“, Алушта, Россия, 2016

**Основные результаты диссертации** опубликованы в следующих работах:

- A. A. Aparin, M. V. Tokarev, Self-similarity of high- $p_T$  hadron production in  $pA$  collisions, PoS (Baldin-ISHEPP-XXI), 067, 2012.
- A. A. Aparin, M. V. Tokarev,  $z$ -Scaling of cumulative hadron production in  $pA$  collisions at high energies, *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements*, Vol. 245, pp. 149-152, 2013.
- A. A. Aparin, M. V. Tokarev, Self-similarity of low- $p_T$  cumulative pion production in proton-nucleus collisions at high energies, *Phys. Part. Nucl. Lett.* Vol. 11, № 2, pp. 91-100, 2014.
- A. A. Aparin, M. V. Tokarev, Self-similarity of high- $p_T$  cumulative hadron production in  $p+A$  collisions at high energies at U70, *Phys. Part. Nucl. Lett.* Vol. 11, № 4, pp. 381-390, 2014.
- A. A. Aparin, M. V. Tokarev, Self-similarity of low- $p_T$  cumulative pion production in proton-nucleus collisions at U70, *Phys. Part. Nucl. Lett.* Vol. 11, № 4, pp. 391-403, 2014, Erratum: [*Phys. Part. Nucl. Lett.* Vol. 11 № 6, pp. 818 2014].
- A. A. Aparin, M. V. Tokarev, Self-similarity of cumulative hadron production in  $pA$  collisions at low- and high- $p_T$ , PoS (Baldin-ISHEPP-XXII), 039, 2014.
- A. A. Aparin, M. V. Tokarev, I. Zborovsky, Fractal structure of hadrons in processes with polarized protons at SPD NICA (Proposal for experiment), *Phys. Part. Nucl. Lett.* Vol. 12, № 1, pp. 48-58, 2015.

- А. А. Апарин, М. В. Токарев, И. Зборовский, Self-similarity of hard cumulative processes in fixed target experiment for BES-II at STAR, *Phys. Part. Nucl. Lett.* Vol. 12, № 2, pp. 221-229, 2015.
- А. А. Апарин, М. В. Токарев, Cumulative hadron production in pA collisions in the framework of  $z$ -scaling, *Int. J. Mod. Phys. Conference Series* Vol. 39, pp. 1560110, 2015.

### Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, двух приложений и списка использованной литературы (содержит 172 наименования). Полный объем диссертации составляет 119 страниц и содержит 29 рисунков и 4 таблицы.

### Содержание

**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 конце приведено краткое содержание работы.

**В первой главе** содержится краткий обзор литературы по проблематике масштабной инвариантности и кумулятивных процессов в физике высоких энергий. Дано определение кумулятивных процессов и приведен способ их выделения из набора фоновых событий. Рассматриваются различные виды „скейлингового“ поведения, установленные в физике элементарных частиц, эксперименты по их открытию и границы их применимости. Показано, что отклонение от такого поведения свидетельствует о наличии новых физических явлений.

**Во второй главе** приведен 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, заложенными в основу метода  $z$  скейлинга. Приведена процедура построения скейлинговой переменной  $z$  и скейлинговой функции  $\Psi(z)$ . Рассматриваются их свойства и их физическая интерпретация.

Основная идея данного метода [1, 2] базируется на предположении В. Ставинского [3], что при высокой энергии столкновений адронов или ядер с импульсами  $P_1$ ,  $P_2$  для описания поведения инклюзивной частицы, рожденной в процессе:  $P_1 + P_2 \rightarrow p + X$ , возможно использовать динамические характеристики элементарного конституентного подпроцесса. Для рассматриваемого инклюзивного подпроцесса на уровне конституентов выполняется закон сохранения импульса:

$$(x_1 P_1 + x_2 P_2 - p)^2 = M_X^2, \quad (1)$$

где  $M_X = (x_1 M_1 + x_2 M_2 + m_2)$  масса нерегистрируемой системы.

Закон сохранения ограничивает область изменения долей импульсов  $x_1$  и  $x_2$  сталкивающихся частиц, уносимых конституентами  $0 < x_1, x_2 < 1$ . В системе центра масс конституентов их энергия столкновения определяется выраже-

нием:  $\hat{s}^{1/2} = \sqrt{(x_1 P_1 + x_2 P_2)^2}$ . Сечение бинарного подпроцесса, необходимого для рождения инклюзивной частицы выражается через минимальную энергию  $\hat{s}_{min}^{1/2}$ :  $d\hat{\sigma}/dt \sim 1/\hat{s}_{min}^2(x_1, x_2)$ .

Параметр подобия  $z$  является безразмерной комбинацией величин, характеризующих рождение частицы в инклюзивной реакции  $P_1 + P_2 \rightarrow p + X$  при больших энергиях, строится как фрактальная мера и определяется следующим выражением:

$$z = z_0 \Omega^{-1}(x_1, x_2), \quad (2)$$

Переменная  $z = z_0 \Omega^{-1}(x_1, x_2)$  представляет собой произведение двух величин:  $z_0$ , которая учитывает динамические характеристики процесса, и  $\Omega^{-1}(x_1, x_2) = (1 - x_1)^{-\delta_1} (1 - x_2)^{-\delta_2}$ , которая определяет модельное поведение переменной  $z$  и имеет смысл разрешения подпроцесса. Величины  $x_1$  и  $x_2$  определяются из условия минимизации разрешения  $\Omega^{-1}(x_1, x_2)$  при котором столкновение партонов может быть выделено из рассматриваемого процесса. Это требование сводится к одновременному выполнению условий (3) и (5):

$$x_1 x_2 - x_1 \lambda_2 - x_2 \lambda_1 = \lambda_0, \quad (3)$$

где величины  $\lambda_i = \lambda_i(P_1, P_2, p, M_1, M_2, m_2)$  ( $i = 0, 1, 2$ ) зависят от импульсов и масс частиц:

$$\lambda_1 = \frac{(P_2 p) + M_2 m_2}{(P_1 P_2) - M_1 M_2}, \quad \lambda_2 = \frac{(P_1 p) + M_1 m_2}{(P_1 P_2) - M_1 M_2},$$

$$\lambda_0 = \frac{0.5(m_2^2 - m_1^2)}{(P_1 P_2) - M_1 M_2}. \quad (4)$$

$$d\Omega(x_1, x_2)/dx_1|_{x_2=x_2(x_1)} = 0. \quad (5)$$

Предполагая, что взаимодействия конститuentов являются самоподобными, концепция  $z$ -скейлинга описывает процесс инклюзивного рождения частицы безразмерной функцией  $\Psi(z)$ , зависящей от одной переменной  $z$ . Этот принцип используется для построения преобразования от одних переменных  $\{p_z, p_T\}$  к другим  $\{z, \eta\}$  и позволяет выразить скейлинговую функцию  $\Psi(z)$  через инвариантное сечение  $E d^3\sigma/dp^3$  и среднюю плотность множественности частиц  $\rho(s, \eta) \equiv dN/d\eta$

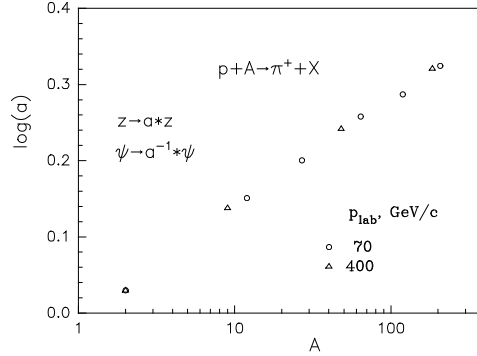
$$\Psi(z) = -\frac{\pi s_A}{(dN/d\eta)\sigma_{in}} J^{-1} E \frac{d^3\sigma}{dp^3}. \quad (6)$$

Здесь  $s_A$  - энергия столкновения в системе центра масс,  $\sigma_{in}$  - полное неупругое сечение взаимодействия,  $J$  - якобиан перехода от переменных  $p_z, p_T$  к  $\{z, \eta\}$ . Условие нормировки для функции  $\Psi(z)$ :  $\int_0^1 \Psi(z) dz = 1$ , позволяет интерпретировать функцию  $\Psi(z)$  как плотность вероятности образования частицы в конечном состоянии с данным значением величины  $z$ .

**В третьей главе** описаны основные результаты анализа спектров рождения заряженных адронов в  $p + A$  столкновениях, полученных на ускорителях



ФНАЛ и У70 группами Д. Кронеина [4, 5], Д. Джаффе [6], Р. Суляева [7]. Все эти эксперименты выполнены с неподвижной мишенью при импульсах налетающих протонов  $p_L = 70, 200, 300, 400$  и  $800$  ГэВ/с. В экспериментах использовались ядерные мишени от дейтерия ( $D$ ) до свинца ( $Pb$ ). В работе [8] проведен подробный анализ этих данных в рамках метода  $z$  скейлинга. Приведены данные по зависимости функции  $\Psi(z)$  от атомного номера ядра мишени в этих экспериментах. Показано, что зависимость сечений рождения частиц от энергии столкновения исчезает в  $z$  представлении данных.



**Рис. 1:** Зависимость параметра масштабного преобразования  $\alpha$  от атомного номера ядра  $A$  в логарифмическом масштабе.

При сравнении результатов рождения частиц на разных мишенях учитывалась зависимость сечений, а следовательно и функции  $\Psi$ , и параметра подобия  $z$  от массового номера ядра  $A$ . Для каждого ядра строилась функция  $\Psi(z)$  с нормировочным параметром  $\sigma_{in}^{pA}/\sigma_{in}^{pp}$  вместо  $\sigma_{in}$ . Величина  $\sigma_{in}^{pA}$  - полное неупругое сечение  $p + A$  взаимодействия. Для построения функции  $\Psi(z)$  из данных Монте-Карло моделирования в генераторе HIJING получена величина  $\rho_A(s, \eta) \equiv dN/d\eta(s, \eta)$  средней плотности множественности вторичных частиц, рожденных в  $p + A$  столкновении. Для разных типов ядер ( $A = 27 - 197$ ) она представима в форме:

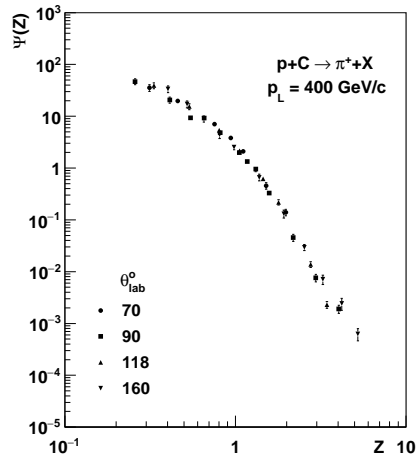
$$\rho_A(s) \simeq 0.67 \cdot A^{0.18} \cdot s^{0.105}, \quad A \geq 2. \quad (7)$$

На рисунке 1 показана зависимость параметра преобразования  $\alpha$  от массового числа  $A$ . Символы ( $\circ, \triangle$ ) обозначают величину  $\alpha$  при которой различные функции совпадают между собой. Явно видна степенная зависимость  $\alpha(A)$ . Из фита был установлен вид этой зависимости  $\alpha = 0.914 \cdot A^{0.15}$ .

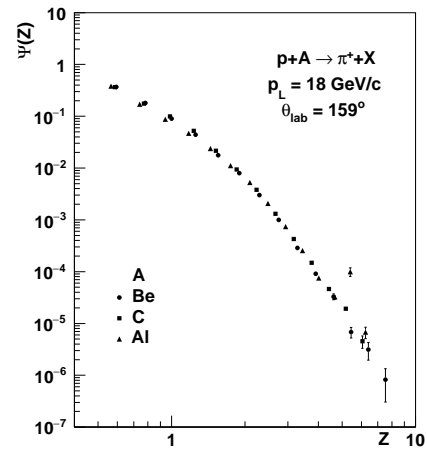
В четвертой главе приведены результаты анализа данных кумулятивного рождения частиц в экспериментах на ускорителях ФНАЛ и У70 проведенных группами Г. Лексина[9], Л. Золина[10] и В. Гапиенко[11]. Данные приведены в двух видах: зависимости сечения от импульса и зависимости функции  $\Psi$  от переменной  $z$ . Описаны найденные закономерности в  $z$  представлении спектров

- самоподобие формы скейлинговой кривой. Данные получены в эксперименте с фиксированной мишенью на выведенном пучке Теватрона [9] и на внутренней мишени протонного синхротрона У70 [10, 11] в инклюзивных реакциях с ядрами  $Li$ ,  $Be$ ,  $C$ ,  $Al$ ,  $Cu$ ,  $Mo$ ,  $Ti$ ,  $Ta$ ,  $W$  в диапазоне импульсов налетающего протона ( $p_L = 18 - 400$  ГэВ/с) и углов вылета инклюзивной частицы ( $\theta_{lab} = 35^\circ - 160^\circ$ ). Установлено, что наблюдающаяся зависимость экспериментальных сечений инклюзивного рождения заряженных адронов от угла вылета частиц и импульса налетающего протона пропадает при переходе к  $z$  представлению спектров. Форма  $\Psi(z)$  восстановлена, принимая во внимание угловую зависимость плотности множественности. Она установлена из сравнения фита кумулятивных и некумулятивных данных в  $z$  представлении между собой ввиду отсутствия экспериментальных данных по угловой зависимости функции  $\rho(s, A, \eta)$ .

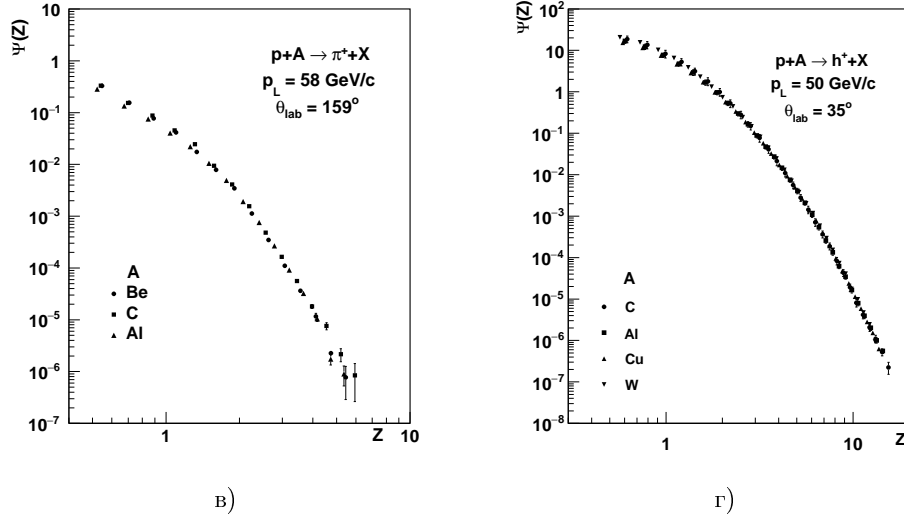
Полученные результаты подтверждают энергетическую независимость и универсальность формы скейлинговой функции, а также закон аддитивности для фрактальной размерности ядер в рождении адронов в  $p + A$  столкновениях при больших поперечных импульсах в кумулятивной и некумулятивной областях.



а)



б)

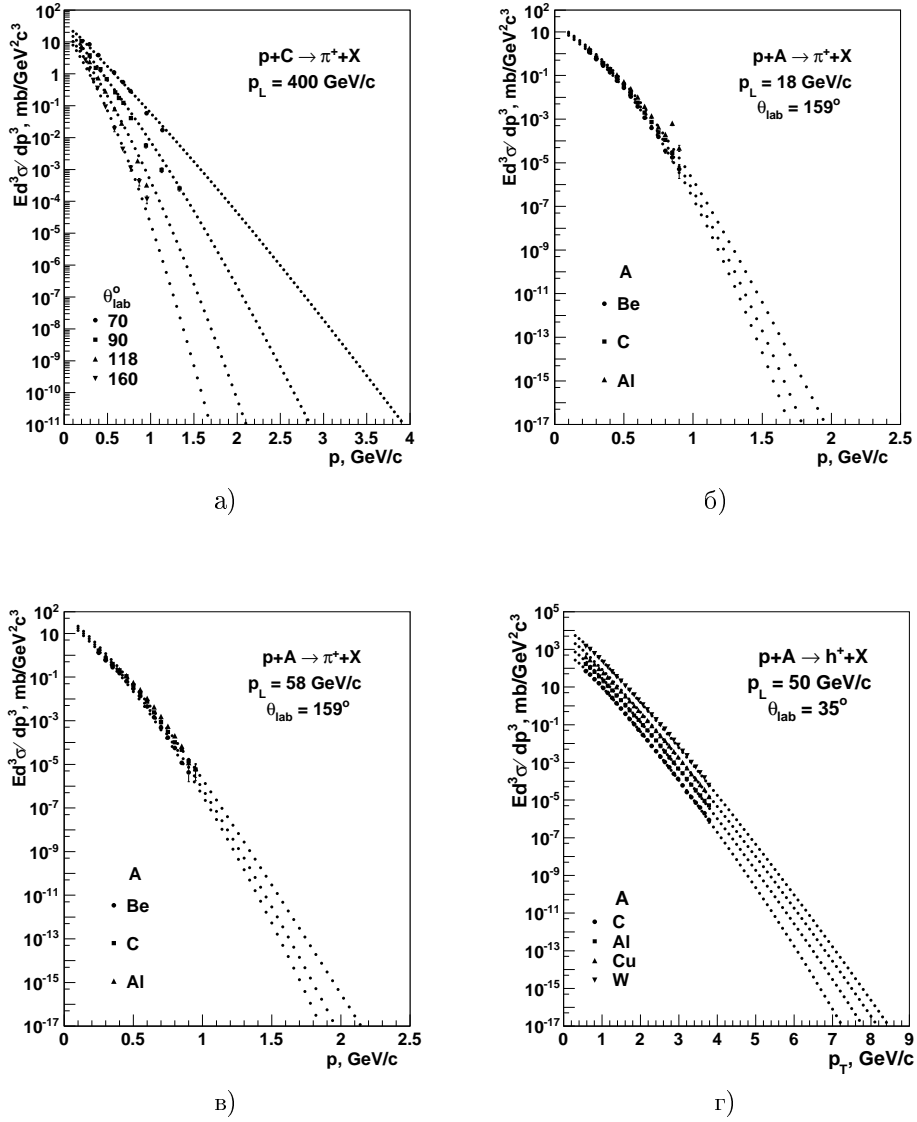


**Рис. 2:** Спектры положительно заряженных пионов (а, б, в) и адронов (г) в  $z$ -представлении для экспериментов групп Лексина (а)[9], Золина (б, в)[10] и Гапиенко (г)[11]

В пятой главе сделано предсказание поведения импульсных спектров заряженных адронов на основе универсальности формы скейлинговой функции  $\Psi(z)$ . Приведены значения фитирующих параметров. В настоящий момент считается, что переход от адронных к кварк-глюонным степеням свободы вблизи критической точки должен сопровождаться большими флуктуациями, корреляциями или резким изменением физических величин, характеризующих систему. Кроме того, в описании процесса взаимодействия протонов и ядер должны присутствовать элементы, связанные с термодинамическими понятиями, например, функции распределения. Поэтому, подход, основанный на методе  $z$  скейлинга, представляется адекватным для поиска сигнатур фазовых переходов и критической точки в  $p + A$  столкновениях.

В ходе анализа обнаружено, что наилучшей функцией для описания спектров в  $z$  представлении является функция Цаллиса [12]. Эта функция используется при фитировании экспериментальных спектров инклюзивных частиц полученных на ЛНС и RHIC. В работе использован следующий вид функции Цаллиса для аппроксимации скейлинговой функции  $\Psi(z)$ :  $\Psi(z) = C \cdot \left[1 + \frac{(q-1) \cdot z}{T}\right]^{1/(1-q)}$ . Ее асимптотическое поведение определяется как:  $\Psi(z) \rightarrow C$  при  $z \rightarrow 0$  и  $\Psi(z) \rightarrow z^{1/(1-q)}$  при  $z \rightarrow \infty$ . Фитирование проводилось при двух свободных параметрах  $C$  и  $T$  и фиксированном значении  $q$  равном 1.080. Это значение получено из фита данных неумультивного рождения [4]-[7]. Зависимость функции  $\Psi(z)$  использовалась для установления параметров фита. За основу взяты данные сечений реакции  $pD$  при импульсах налетающего прото-

на  $p_L = 70, 400 \text{ ГэВ}/c$ .



**Рис. 3:** Спектры положительно заряженных пионов (а, б, в) и адронов (г) с предсказанием поведения на глубоко-кумулятивную область, посчитанные на основе  $z$ -скейлинга для экспериментов групп Лексина (а)[9], Золина (б, в)[10] и Гапиенко (г)[11]

Полученная в результате параметризация  $\Psi(z)$  в виде  $q$ -экспоненты Цаллиса использована для экстраполяции скейлинговой функции в более широкий интервал  $z$  и для расчета инклюзивных сечений рождения частиц в  $p +$

А столкновениях для расширенной кинематики экспериментов Г. Лексина[9], Л. Золина[10] и В. Гапиенко[11].

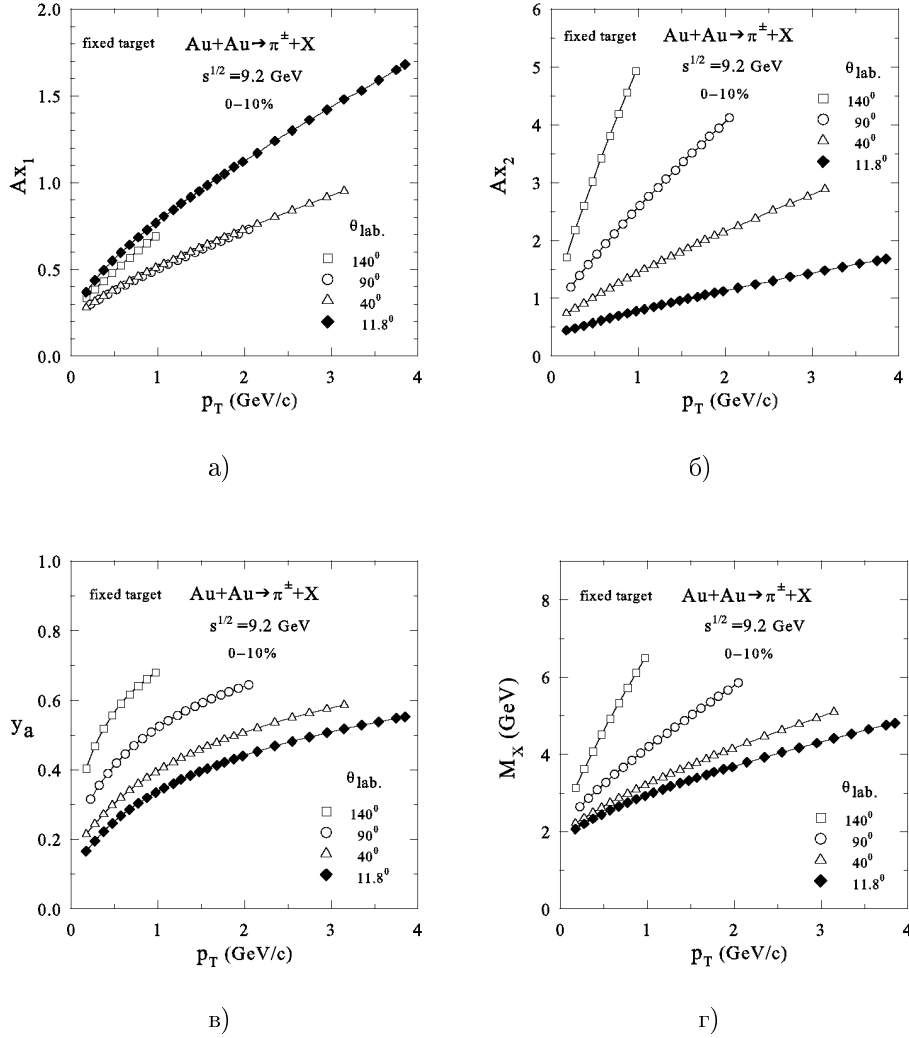
После того, как для каждого набора данных получены оптимальные значения параметров функции Цаллиса, она была продлена на область за пределами экспериментальных данных. Результаты предсказательных расчетов дают оценки сечений рождения пионов и адронов в глубоко-кумулятивной области. Основным интерес представляла область больших  $z$ , в которой ожидается большая степень кумуляции ядерной материи. Сделан обратный пересчет зависимости  $\Psi(z)$  в зависимость  $Ed^3\sigma/dp^3$  от  $p_T$  (или  $p$ ). Результаты представлены на рис. 3.

**В шестой главе** сформулировано предложение к проведению исследования поведения частиц, рожденных от фрагментации мишени, в эксперименте с фиксированной мишенью на детекторе STAR. Приведены расчеты кинематических характеристик рождения вторичных частиц при различных начальных условиях. Приведено расширение метода  $z$  скейлинга на случай столкновения тяжелых ионов. Показано преимущество изучения рождения кумулятивных частиц в заднюю полусферу с целью поиска сигнатур фазовых переходов. Одной из возможностей постановки эксперимента с фиксированной мишенью на установке STAR, спроектированной для работы в коллайдерной моде, является использование одного из пучков ускорителя и мишени расположенной в концевой части детектора. Кроме очевидного увеличения светимости при низких энергиях столкновений, подобный эксперимент предпочтителен для изучения кумулятивных процессов.

Построены кинематические границы для различных энергий столкновения и различных сталкивающихся ядер. Граница области  $p + p$  столкновений определяет границу кумулятивного рождения частиц. Область между линиями  $p + p$  и  $p + d$  соответствует однократной кумуляции. Между  $p + d$  и  $d + d$  - двойной, и так далее. Предполагается, что на соответствующей кинематической границе ядро полностью сжато и ведет себя как частица с размерами нуклона и массой всего ядра. Энергетическая зависимость кинематических границ в диапазоне энергии столкновений  $\sqrt{s_{NN}} = 7.7 - 19.6$  ГэВ достаточно слабая.

В работах [13, 14] предложен расширенный вариант формализма  $z$  скейлинга для анализа инклюзивных спектров при высоких энергиях (Tevatron и RHIC) и показано его обобщение для ядро-ядерных столкновений. Основная причина обобщения была связана с тем обстоятельством, что при взаимодействии ядер высоких энергий существенную роль играет центральность столкновения и следовательно имеет место более сложная, чем в  $p + p$  и  $p + A$  взаимодействиях зависимость фрагментации от ядерной среды.

На рис. 4 показана зависимость долей импульсов  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $y_1$  и нерегистрируемой массы  $M_X$  от поперечного импульса пиона, образующегося в центральных (0 – 10%) столкновениях ионов золота при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$  ГэВ и углах  $\theta_{lab} = 11.8^\circ - 140^\circ$ .



**Рис. 4:** Зависимость долей импульсов  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $y_a$  и неригистрируемой массы  $M_X$  от поперечного импульса пиона, образующегося в центральных 0 – 10% столкновениях ионов золота при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$  ГэВ и углах  $\theta_{lab} = 11.8^\circ - 140^\circ$ .

В расширенной модели параметр подобия определяется следующим выражением:  $z = z_0 \Omega^{-1}$ , где

$$z_0 = \frac{\sqrt{s_\perp}}{m_N (dN/d\eta|_{\eta=0})^\epsilon}, \quad (8)$$

$$\Omega(x_1, x_2, y_1, y_2) = (1 - x_1)^{\delta_1} (1 - x_2)^{\delta_2} (1 - y_1)^{\epsilon_F} (1 - y_2)^{\epsilon_F}. \quad (9)$$

В этих выражениях введены дополнительные модельные параметры  $s$ ,  $\epsilon$  и величины  $y_1$ ,  $y_2$ . Параметр  $s$  имеет смысл „теплоемкости среды“, образован-

ной в столкновении ядер, а  $\epsilon_F$  - фрактальной размерности процесса фрагментации. Скейлинговая функция  $\Psi(z)$  определяется в этом случае как  $\Psi(z) = -\frac{\pi s}{(dN/d\eta)\sigma_{in}} J^{-1} E \frac{d^3\sigma}{dp^3}$ . Физический смысл функции  $\Psi(z)$  как плотности вероятности рождения частицы с заданным значением параметра подобия  $z$  сохраняется.

Возможность описания инклюзивных спектров адронов в  $A + A$  столкновениях универсальной скейлинговой функцией  $\Psi(z)$  накладывает ограничения на модельные параметры  $c$ ,  $\delta$  и  $\epsilon_F$ . Резкие изменения фрактальных размерностей  $\delta$ ,  $\epsilon_F$  и „удельной теплоемкости“  $c$  являются сигнатурами новых эффектов, например фазовых переходов. Однако, такое поведение модельных параметров, может быть „смазано“ потерями энергии конститuentов в образующейся ядерной среде. Рост  $\epsilon_F$  с увеличением центральности соударения соответствует увеличению потерь энергии. Рост потерь энергии затрудняет поиск положения критической точки. Частично эту проблему можно обойти, переходя в кумулятивную область  $x_1 A_1, x_2 A_2 > 1$ . Это соответствует кумулятивному рождению частиц с большими поперечными импульсами. В рамках  $z$ -скейлинга предсказывается зависимость потерь энергии конститuenta от энергии и центральности столкновения, поперечного импульса, типа частицы. Предполагается, что переход в кумулятивную область при фиксированной центральности является существенным условием для поиска фазовых переходов и положения критической точки.

Кумулятивная область  $x_1 A_1, x_2 A_2 > 1$  достижима только при относительно низких энергиях. Уменьшение потерь энергии с увеличением поперечного импульса  $p_T$  значительно при низких энергиях в центральной области псевдобыстрот  $x_1 A_1 \simeq x_2 A_2 > 1$ . Кумулятивная область достижима также при фрагментации мишени  $x_1 A_1 > 1, x_2 A_2 < 1$  или пучка  $x_1 A_1 < 1, x_2 A_2 > 1$ . Необходимые для рождения кумулятивных частиц в заднюю полусферу (фрагментация мишени) импульсы значительно меньше, чем при фрагментации в переднюю полусферу.

Ожидается, что при переходе в кумулятивную область для инклюзивной частицы, рождение которой сопровождается высокой множественностью, может произойти дополнительная селекция событий с высокой плотностью ядерной материи. Уменьшение потерь энергии совместно с дополнительным сжатием ядерной материи может обеспечить более точную локализацию КТ и пролить свет на структуру фазовой диаграммы.

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

1. Проведен систематический анализ экспериментальных данных по кумулятивному рождению заряженных адронов в столкновениях протонов и ядер, полученных группами Г. Лексина (ФНАЛ), Л. Золина и В. Гапиенко (ИФВЭ), в инклюзивных реакциях с ядрами  $Li, Be, C, Al, Cu, Mo, Ti, Ta, W$  в широком диапазоне импульсов налетающего протона ( $p_L = 18 - 400$  ГэВ/с) и углов вылета инклюзивной частицы ( $\theta_{lab} = 35^\circ - 160^\circ$ ), в рамках метода  $z$ -скейлинга.

2. Построена скейлинговая функция  $\Psi(z)$  для процесса рождения инклюзивных пионов и заряженных адронов в  $p + A$  взаимодействиях в кумулятивной области. Функция  $\Psi(z)$  интерпретируется как плотность вероятности рождения инклюзивной частицы с определенным значением параметра подобия  $z$ .
3. Установлено самоподобие кумулятивного рождения пионов и заряженных адронов в столкновениях протонов с различными ядрами ( $Li, Be, C, Al, Cu, Mo, Ti, Ta, W$ ) в диапазоне импульсов налетающего протона ( $p_L = 18 - 400$  ГэВ/с) в области больших и малых поперечных импульсов. Подтверждены закон аддитивности фрактальной размерности ядер и степенная асимптотика скейлинговой функции при больших значениях параметра подобия ( $z > 4$ ).
4. Проведено сравнение данных по инклюзивным сечениям рождения кумулятивных пионов и заряженных адронов в  $p + A$  столкновениях при малых и больших поперечных импульсах с данными по сечениям рождения адронов с большими поперечными импульсами и установлено совпадение форм скейлинговой функции  $\Psi(z)$  в области их перекрытия, при кумулятивном и некумулятивном рождении.
5. Подтвержден микроскопический сценарий рождения адронов в кумулятивной и некумулятивной областях в  $p + A$  взаимодействиях на уровне конститuentов. Установлены зависимости долей импульса  $x_1, x_2$  от полного импульса налетающего протона и ядра-мишени, а также инклюзивной частицы, для различных ядер.
6. Получено подтверждение гипотезы о том, что  $z$ -скейлинг отражает фундаментальные принципы - локальность, фрактальность и самоподобие в рождении кумулятивных пионов и заряженных адронов при взаимодействии протонов и ядер.
7. На основе результатов проведенного исследования по проверке  $z$ -скейлинга в рождении кумулятивных пионов и заряженных адронов в столкновениях протонов и ядер ( $Li, Be, C, Al, Cu, Mo, Ti, Ta, W$ ) в диапазоне импульсов налетающего протона ( $p_L = 18 - 400$  ГэВ/с) с большими и малыми поперечными импульсами не обнаружено сигнатур фазовых переходов в исследованной кинематической области.
8. На основе установленной зависимости параметра подобия  $z$  от импульса инклюзивной частицы, рожденной в  $p + A$  столкновениях в заданной кинематике экспериментов Г. Лексина, Л. Золина и В. Гапиенко, определены области предпочтительные для поиска сигнатур фазовых переходов в ядерной материи.
9. В результате анализа комбинированного набора экспериментальных данных по инклюзивным сечениям, соответствующих рождению частиц в



$p + A$  столкновениях в кумулятивной и некумулятивной областях с большими и малыми поперечными импульсами получена параметризация скейлинговой функции  $\Psi(z)$  в виде функции распределения Цаллиса.

10. На основе установленных свойств  $z$  скейлинга проведены предсказательные расчеты инвариантных сечений рождения пионов и заряженных адронов в  $p + A$  столкновениях при импульсах протона  $p_L = 18 - 400$  ГэВ/с для различных ядер-мишеней ( $Li, Be, C, Al, Cu, Mo, Ti, Ta, W$ ) и углов вылета инклюзивной частицы ( $\theta_{lab} = 35^\circ - 160^\circ$ ) в глубоко-кумулятивной области.
11. Предложено использовать жесткие кумулятивные процессы рождения адронов в  $Au + Au$  столкновениях во второй фазе программы энергетического сканирования на RHIC в эксперименте с фиксированной мишенью с целью поиска сигнатур фазовых переходов. Получены оценки потерь энергии конститuenta при рождении инклюзивной частицы, в центральных  $Au + Au$  столкновениях при энергии столкновения  $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$  ГэВ в зависимости от поперечного импульса и угла вылета регистрируемой частицы. Показано, что отбор событий с рождением пионов с большими поперечными импульсами  $p_T > 1$  ГэВ/с в  $Au + Au$  столкновениях с фиксированной мишенью при  $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$  ГэВ в заднюю полусферу  $\theta_{lab} > 140^\circ$ , обеспечивает высокую кумуляцию ( $Ax_2 > 5$ ) ядра-мишени с малыми потерями энергии конститентов.

## Список литературы

- [1] I. Zborovský, Yu. A. Panebratsev, M. V. Tokarev, G. P. Škoro,  $Z$  scaling in hadron hadron collisions at high-energies, *Phys. Rev.* **D54**, 5548 (1996).
- [2] I. Zborovský, Yu. A. Panebratsev, M. V. Tokarev, G. P. Škoro,  $Z$  scaling in proton nucleus collisions at high-energies, *Phys. Rev.* **C59**, 2227 (1999).
- [3] В. С. Ставинский, Предельная фрагментация ядер - кумулятивный эффект (эксперимент), *Sov. J. Part. Nucl.* **10**, 949 (1979).
- [4] J. W. Cronin *et al.*, Production of hadrons with large transverse momentum at 200-GeV, 300-GeV, and 400-GeV, *Phys. Rev.* **D11**, 3105 (1975).
- [5] D. Antreasyan *et al.*, Production of hadrons at large transverse momentum in 200-GeV, 300-GeV and 400-GeV  $pp$  and  $pn$  collisions, *Phys. Rev.* **D19**, 764 (1979).
- [6] D. Jaffe *et al.*, High transverse momentum single hadron production in  $pp$  and  $pd$  collisions at  $\sqrt{s} = 27.4$ -GeV and  $\sqrt{s} = 38.8$ -GeV, *Phys. Rev.* **D40**, 2777 (1989).

- [7] V. V. Abramov *et al.*, Hadron production at transverse momenta from 0.5-GeV/c up to 2.2-GeV/c in proton proton collisions at 70-GeV, *Sov. J. Nucl. Phys.*, **31** 484 (1980). [*Nucl. Phys.* **B173**, 348 (1980).]  
V. V. Abramov *et al.*, Large transverse momentum inclusive hadron production in *pp* collisions at 70-GeV, *Sov. J. Nucl. Phys.* **41**, 700 (1985).
- [8] M. V. Tokarev, I. Zborovský, Yu. A. Panebratsev, G. P. Škoro, Scaling features of hadron production in  $\pi$ -p and  $\pi$ -A collisions at high  $p_T$ , *Int. J. Mod. Phys.* **A16**, 1281 (2001).
- [9] N. A. Nikiforov *et al.*, Backward production of pions and kaons in the interaction of 400-GeV protons with nuclei, *Phys. Rev.* **C22**, 700 (1980).
- [10] O. P. Gavrishchuk, N. S. Moroz, V. P. Peresedov, L. S. Zolin, I. M. Belyaev and V. V. Lobanov, Charged pion backward production in 15-GeV - 65-GeV proton nucleus collisions, *Nucl. Phys.* **A523**, 589 (1991).  
I. M. Belyaev, O. P. Gavrishchuk, L. S. Zolin and V. F. Peresedov, Cumulative production of pions and kaons in proton - nucleus interactions at energies from 15-GeV to 65-GeV, *Phys. Atom. Nucl.* **56**, 1378 (1993).
- [11] V. V. Ammosov *et al.*, Measurement of the yields of positively charged particles at an angle of  $35^\circ$  in proton interactions with nuclear targets at an energy of 50 GeV, *Phys. Atom. Nucl.* **76**, 1213 (2013).
- [12] J. Cleymans, G. I. Lykasov, A. S. Parvan, A. S. Sorin, O. V. Teryaev and D. Worku, Systematic properties of the Tsallis distribution: Energy dependence of parameters in high-energy *pp* collisions, *Phys. Lett.* **B723**, 351 (2013).
- [13] M. V. Tokarev, I. Zborovský New properties of  $z$ -scaling: Flavor independence and saturation at low  $z$ , *Int. J. Mod. Phys.* **A24**, 1417 (2009).
- [14] M. V. Tokarev and I. Zborovský Energy scan in heavy-ion collisions and search for a critical point, *Phys. At. Nucl.* **75**, 700 (2012).