

Д-263

01000

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1-2007-133

На правах рукописи
УДК 539.171, 53.043, 53.072

ДЕДОВИЧ
Татьяна Григорьевна

**СКЕЙЛИНГОВЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РОЖДЕНИЯ
НЕЙТРАЛЬНЫХ МЕЗОНОВ И СТРУЙ
В ПРОТОН-(АНТИ)ПРОТОННЫХ И ПРОТОН-ЯДЕРНЫХ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ**

Специальность: 01.04.16 — физика ядра и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Объединенный институт
ядерных исследований
Дубна 2007
БИБЛИОТЕКА

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

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

ТОКАРЕВ
Михаил Владимирович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

ДОРОХОВ
Александр Евгеньевич

доктор физико-математических наук,
профессор

КОРОТКИХ
Владимир Леонидович

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Московский инженерно-физический институт

Защита состоится "....." 2007 года в "....." часов
на заседании диссертационного совета при Лаборатории
высоких энергий Объединенного института ядерных
исследований, по адресу: 141980, г. Дубна Московской области,
ЛВЭ ОИЯИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ
ОИЯИ.

Автореферат разослан "....." 2007 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

В.А. Арефьев



Общая характеристика работы

В диссертации представлены результаты изучения свойств z -скейлинга в рождении π^0 мезонов в $p + p(\bar{p}, A)$ взаимодействиях, η^0 -мезонов в $p + p$ и струй в $p + p(\bar{p})$ столкновениях при высоких энергиях. Для анализа использовались экспериментальные данные, полученные на коллайдерах ISR, Sp̄pS, Tevatron и RHIC коллаборациями AFS, UA1, UA2, D0, CDF, E557, PHENIX и STAR. Представлены результаты предсказательных расчетов импульсных спектров мезонов и струй в широкой области энергий столкновения и поперечных импульсов, рожденных частиц/струй. Результаты анализа сравниваются, в рамках z -скейлинга, с последними данными RHIC и Tevatron. Определяются критерии возможного нарушения z -скейлинга. Приведены результаты исследований влияния параметров конусного алгоритма реконструкции струй на вероятность выделения N -струйных событий, характеристики и спектры струй в p_T и z представлениях. Таким образом в диссертации представлены результаты, обобщающие теорию z скейлинга на процессы инклюзивного рождения нейтральных мезонов и струй и демонстрирующие прикладные возможности z скейлинга как метода анализа экспериментальных данных в поиске новых закономерностей рождения частиц в физике высоких энергий.

Актуальность изучаемых задач

Поиск скейлинговых закономерностей всегда был предметом интенсивных исследований при изучении взаимодействий частиц и ядер высоких энергий. Как правило, их открытия (скейлинги Бьеркена, Фейнмана, Кобы-Нильсена-Олесена, кумулятивное рождение и др.) способствовали выявлению новых свойств взаимодействия и структуры частиц, а также существенному продвижению в развитии теории сильных взаимодействий. Установленные закономерности позволили вычислять различные характеристики процессов (сечения, структурные функции, распределения по множественности и др.) в новых кинематических областях и, тем самым, демонстрировали предсказательную силу существующих теорий. Отклонения от скейлингового поведения наблюдаемых характеристик, установленного для достаточно широкой экспериментально-исследованной кинематической области, как правило, считаются проявлением новых физических явлений. Эти отклонения в дальнейшем изучаются и используются для последующего развития теории.

Одним из основных методов исследования ядерной материи и свойств среды, образующейся при взаимодействии адронов и ядер является поиск нарушения закономерностей, установленных для частицы с большими поперечными импульсами и струй в элементарных лептон-адронных и адрон-адронных взаимодействиях. Последние представляют собой коллимированные в пространстве и времени потоки высокоэнергетических частиц. Считается, что они являются результатом взаимодействия элементарных конститuentов (кварков и глюонов).

Изучение скейлинговых закономерностей рождения струй, отражающих механизм их образования и структуру, требует адекватного соответствия между теоретическим описанием струй в рамках теории КХД и их экспериментальным представлением. Последнее требует определения этих объектов в терминах измеряемых

величин, получаемых с использованием адронных и электромагнитных калориметров или других детектирующих приборов. Поиск такого соответствия, исследование влияния параметров алгоритмов реконструкции на спектры струй, определение области оптимальных значений этих параметров является актуальным и представляет одну из основных задач физики струй.

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]. 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 является актуальной задачей. Ее решение нацелено на установления новых физических закономерностей в физике высоких энергий, проверку предсказательной силы КХД, а также на установление дополнительных ограничений на модели рождения адронов. 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, структурность кварков, фрактальность пространства и времени, новые виды взаимодействий.

Цель исследования

Целью работы является:

- Построение скейлинговой функции $\psi(z)$ и переменной z для процесса инклюзивного рождения π^0 мезонов в $p + p(\bar{p}, A)$ взаимодействиях, η^0 мезонов в $p + p$ и струй в $p + p(\bar{p})$ столкновениях.

- Исследование свойств z представления нейтральных мезонов и струй в рассматриваемых процессах. Сравнение свойств скейлинговой функции $\psi(z)$ для π^0 мезонов и струй в $p + p$ и $\bar{p} + p$ взаимодействиях. Проверка z скейлинга для нейтральных мезонов и струй на RHIC и Tevatron при энергиях 200 и 1960 ГэВ, соответственно.

- Предсказание импульсных спектров π^0 мезонов в $p + p(\bar{p}, A)$ взаимодействиях, η^0 мезонов в $p + p$ и струй в $p + p(\bar{p})$ столкновениях при энергиях RHIC, Tevatron и LHC в более широкой области поперечных импульсов.

- Установление критерия и области оптимального поиска возможного нарушения z -скейлинга в столкновениях адронов/струй при более высоких энергиях.

- Исследование влияния параметров конусного алгоритма реконструкции струй на вероятность выделения N -струйных событий, характеристики и спектры струй в p_T и z представлениях.

Научная новизна

В диссертации:

- Впервые построена скейлинговая функция $\psi(z)$ и переменная z для рождения π^0 мезонов в $p + p$, $\bar{p} + p$ и $p + A$ взаимодействиях и η^0 мезонов в $p + p$ и струй в $p + p$, $\bar{p} + p$ столкновениях при высоких энергиях.

- Впервые изучены свойства z -скейлинга в адрон-адронных и адрон-ядерных процессах рождения нейтральных мезонов и струй при высоких энергиях. Установлена энергетическая, угловая независимость и степенное поведение скейлинговой функции $\psi(z)$ при больших значениях z . Установлена A -зависимость преобразования $\alpha(A)$, позволяющего сравнивать скейлинговые функции для различных ядер и свидетельствующая о самоподобном характере влияния ядерной среды на механизм формирования частиц с большими поперечными импульсами.

- Впервые на основе z -скейлинга предсказаны импульсные спектры π^0 мезонов в $p + p$, $\bar{p} + p$ и $p + A$ взаимодействиях, спектры η^0 мезонов $p + p$ и струй в $p + p$, $\bar{p} + p$ столкновениях для различных кинематических диапазонов при энергиях RHIC, Tevatron и LHC.

- Впервые определены критерии и области оптимального поиска возможного нарушения z -скейлинга в столкновениях при более высоких энергиях.

- Впервые установлена степень влияния параметров конусного алгоритма на спектры струй в z представлении.

Научно-практическая ценность работы

- Созданы программы для построения и исследования свойств скейлинговой функции $\psi(z)$ и переменной z для рождения π^0 мезонов в $p + p$, $\bar{p} + p$ и $p + A$ взаимодействиях, η^0 мезонов в $p + p$ и струй в $p + p$, $\bar{p} + p$ столкновениях.

- На основании установленных свойств z -скейлинга, предсказаны спектры π^0 мезонов в $p + p(\bar{p}, A)$ взаимодействиях, η^0 мезонов в $p + p$ и струй в $p + p(\bar{p})$ столкновениях при энергиях RHIC, Tevatron и LHC.

- Предложена сигнатура для поиска новых физических закономерностей при рождении частиц/струй в рамках теории z скейлинга.

- Указаны кинематические границы независимости спектров струй в z представлениях от параметров конусного алгоритма реконструкции струй.

- Показана принципиальная возможность применения метода для анализа новых экспериментальных данных и планирования экспериментов по рождению нейтральных мезонов и струй как при более высоких энергиях достижимых на LHC, так и при меньших энергиях в области больших поперечных импульсов.

Защищаемые положения

- Построение скейлинговых функций $\psi(z)$ для рождения π^0 мезонов в $p + p$, $\bar{p} + p$ и $p + A$ взаимодействиях, η^0 мезонов в $p + p$ и струй в $p + p$ и $\bar{p} + p$ столкновениях при высоких энергиях.

- Свойства z -скейлинга в рождении нейтральных мезонов и струй в $p + p(\bar{p}, A)$ столкновениях. Энергетическая, угловая независимость и степенное поведение скейлинговой функции ($\psi(z) \sim z^{-\beta}$) при больших значениях z . Различие параметров наклона β скейлинговой функции $\psi(z)$ в $p + p$ и $\bar{p} + p$ взаимодействиях ($\beta_{pp} > \beta_{\bar{p}p}$). Зависимость преобразования $z \rightarrow \alpha(A)z$, $\psi \rightarrow \alpha^{-1}(A)\psi$ от атомного номера ядра (A -зависимость), используемого при сравнении функций $\psi(z)$ для различных ядер.

- Предсказания на основе z скейлинга импульсных спектров π^0 мезонов в $p + p(\bar{p}, A)$ взаимодействиях, η^0 мезонов в $p + p$ и струй в $p + p(\bar{p})$ столкновениях

для различных кинематических диапазонов при энергиях RHIC, Tevatron и LHC.

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

- Результаты выбора параметров конусного алгоритма реконструкции струй в $p + p$ взаимодействиях при $\sqrt{s} = 200$ ГэВ. Установлено, что параметр $E_{seed} = (0.5 - 1.5)$ ГэВ не влияет, а E_{cut} и R изменяют тип реконструированных событий (1, 2, ..., N -струйные). Показано, что точность восстановления двумя лидирующими струями (в N -струйных событиях) поперечного импульса и направления жестко рассеянного партона не зависит от параметра E_{cut} при $R=0.7$ и чувствительна к величине параметра R .

- Зависимость инклюзивных сечений струй и их z -представлений в области $E_T^{Jet} < 25$ ГэВ и независимость наклона β скейлинговой функции в области $E_T^{Jet} = (25 - 60)$ ГэВ от параметров конусного алгоритма.

Основные публикации и апробация работы

Материалы, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на научных семинарах ЛВЭ, ЛВЭ-ЛФЧ ОИЯИ, ИТЭФ, БНЛ, ХУ, XVII и XVIII Международных семинарах по проблемам физики высоких энергий "Релятивистская ядерная физика и квантовая хромодинамика" (Дубна, 2000, 2004, 2006); сессии-конференции секции ЯФ ОФН РАН "Физика фундаментальных взаимодействий" (Москва, 2004), рабочих совещаниях "Hard probes in heavy-ion collisions at the LHC" (ЦЕРН, 2001-2003), "Relativistic Nuclear Physics: From Hundreds of MeV to TeV" (Slovakia, Stara-Lesna, 2003; Dubna, 2005), XXXIII Международной конференции по физике высоких энергий (Москва, 2006), рабочем совещании Европейской исследовательской группы по физике ультрарелятивистских тяжелых ионов (Дубна, 2006). Результаты исследований, представленных в диссертации, опубликованы в 8 работах.

Содержание работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, четырех приложений и списка цитируемой литературы (286 наименований). Общий объем 192 страницы, в том числе 56 рисунков и 5 таблиц.

Во введении кратко описаны наиболее известные скейлинговые закономерности, установленные в физике высоких энергий. Обосновывается актуальность темы, формулируются цели и задачи диссертационной работы, описывается научная новизна и научно-практическая ценность работы. Приводятся основные защищаемые положения, а также список публикаций и апробаций по теме диссертационной работы. В конце раздела приводится краткое содержание диссертации по главам.

В первой главе дан обзор литературы, в котором представлено описание наиболее известных скейлинговых закономерностей, установленных во взаимодействиях частиц (лептонов, адронов и ядер) высоких энергий. Приведены области их применимости, связанные с классом изучаемых явлений. Описаны физические интерпретации моделей и скейлинговых переменных, используемых для анализа экспериментальных данных. Отмечается, что обнаружение отклонений от скейлингов

являются стимулом для дальнейшего развития теоретических моделей.

Отдельный раздел обзора посвящен описанию z -скейлинга. Представлены формулировки основных принципов положенных в его основу. Описана процедура построения скейлинговой функции и скейлинговой переменной, типы анализируемых процессов, кинематические границы применимости скейлинга, свойства z представления. Отмечаются предсказательные возможности описываемого метода анализа.

В основу данного феноменологического подхода положены принципы локальности, самоподобия и фрактальности. z -Скейлинг и его обобщения описывают процессы инклюзивного рождения адронов, прямых фотонов и струй в адрон-адронных, адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях. Диапазон рассматриваемых энергий составляет $\sqrt{s} = (19 - 1960)$ ГэВ. z -Скейлинг применяется для описания спектров частиц/струй в области углов $\theta = 3^\circ - 90^\circ$, поперечных импульсов адронов $p_T = (0.2 - 40)$ ГэВ/с, прямых фотонов $p_T = (4 - 250)$ ГэВ/с и струй $p_T = (25 - 500)$ ГэВ/с. Обобщенный z -скейлинг описывает процессы рождения адронов с различными плотностями множественности вплоть до $dN_{ch}/d\eta = 26$. Скейлинговая функция $\psi(z)$ демонстрирует энергетическую, угловую независимость и степенной характер в области больших z . Такое поведение $\psi(z)$ указывает на возможность описания как мягкого, так и жесткого процесса образования частиц в рамках z -скейлинга. Мягкий режим соответствует малым значениям z , а для жесткого режима характерно степенное поведение $\psi(z) \sim z^{-\beta}$ при больших z . Степенное поведение отражает фрактальный процесс образования частиц и дает основание полагать, что это общее свойство образования частиц при больших z . Поэтому экспериментальная проверка, установленной закономерности, представляет значительный интерес как для развития моделей, описывающих рождение частиц, так и представлений о свойствах пространства-времени на малых масштабах $\sim (10^{-2} - 10^{-4})$ Фм. Свойства z -скейлинга позволяют предсказать спектры адронов, прямых фотонов в $h + h$, $h + A$ и $A + A$ взаимодействиях, а так же спектры струй в $p(\bar{p}) + p$ столкновениях при энергиях RHIC, Tevatron и LHC. Возможно использование z скейлинга как одного из методов поиска новых физических закономерностей, таких как фазовые переходы в адронной и ядерной материи, новые виды взаимодействия, связанные с существованием подструктуры кварков и глюонов. Обнаружение данных закономерностей проявилось бы в нарушении установленных свойств z скейлинга.

Во второй главе описан общий формализм z -скейлинга для анализа инклюзивных процессов. Данный феноменологический метод основывается на предположении, что особенности спектра рождения инклюзивной частицы в реакции $P_1 + P_2 \rightarrow p + X$ при высоких энергиях могут быть описаны в терминах соответствующих кинематических характеристик эксклюзивного подпроцесса конститuentов

$$(x_1 M_1) + (x_2 M_2) \rightarrow m_1 + (x_1 M_1 + x_2 M_2 + m_2). \quad (1)$$

Величины x_1 и x_2 представляют собой доли импульсов P_1 и P_2 сталкивающихся объектов с массами M_1 и M_2 , переносимые конститuentами. Параметр m_2 вводится для выполнения аддитивных законов сохранения по изоспину, барионному заряду,

странности и др. Описание процесса взаимодействия адронов и ядер в терминах взаимодействия их конstituентов демонстрируется на рис. 1. Локальность адронных взаимодействий учитывается законом сохранения 4-импульса для подпроцесса взаимодействия конstituентов. В основе построения z -скейлинга лежит принцип

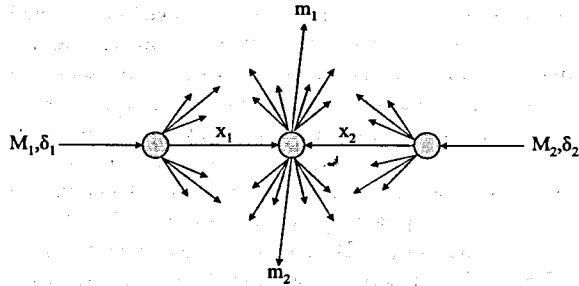


Рис. 1: Диаграмма взаимодействия адронов/ядер на уровне конstituентов.

самоподобия, т.е. описание инклюзивного рождения частицы в терминах набора параметров не содержащих характерных масштабов независимых переменных. Таким образом рождение частицы, в рамках z -скейлинга, описывается безразмерной скейлинговой функцией $\psi(z)$, которая зависит от безразмерной переменной z

$$\psi(z) \equiv \frac{1}{N\sigma_{inl}} \frac{d\sigma}{dz}. \quad (2)$$

Здесь σ_{inl} - неупругое инклюзивное сечение, N - средняя множественность. Скейлинговая переменная z является безразмерной комбинацией величин, характеризующих рождение частицы в инклюзивной реакции при больших энергиях, и конструируется как фрактальная мера

$$z = z_0 \Omega^{-1}(x_1, x_2), \quad \Omega(x_1, x_2) = (1 - x_1)^{\delta_1} (1 - x_2)^{\delta_2}. \quad (3)$$

Величина $\Omega(x_1, x_2)$ имеет степенную зависимость от переменных x_1, x_2 , определяемую значениями фрактальных размерностей сталкивающихся объектов δ_1 и δ_2 (z_0 - слабоменяющаяся функция тех же переменных). $\Omega^{-1}(x_1, x_2)$ описывает разрешение, при котором элементарное столкновение конstituентов может быть выделено из рассматриваемого инклюзивного процесса. Величина $\Omega(x_1, x_2)$ связывает кинематические (x_1, x_2) и структурные (δ_1, δ_2) характеристики изучаемых частиц. Концепция z -скейлинга, применяемая для описания процессов рождения частиц при высоких энергиях базируется на общих фундаментальных принципах (локальности, самоподобия и фрактальности), которые имеют широкую область применимости в различных областях физики.

Скейлинговая функция $\psi(z)$ и переменная z выражаются через экспериментально измеряемые величины - инклюзивное сечение рождения $E d^3\sigma/dp^3$ и среднюю плотность множественности $dN/d\eta$.

$$\psi(z) = -\frac{\pi s}{(dN/d\eta)\sigma_{inl}} J^{-1} E \frac{d^3\sigma}{dp^3}, \quad z = \frac{\sqrt{s_1}}{m(dN/d\eta)|_{\eta=0}} \cdot \Omega^{-1}. \quad (4)$$

Здесь \sqrt{s} - энергия столкновения в системе центра масс, σ_{inl} - полное неупругое сечение взаимодействия, m - массовый коэффициент, равный массе нуклона, $\sqrt{s_1}$ - поперечная энергия элементарного подпроцесса, $J = J(P_{1,2}, p_1, M_{1,2}, m_1)$ - коэффициент зависящий от кинематических переменных. Формулы выражающие $x_{1,2}$, $\sqrt{s_1}$ и J через импульсы и массы сталкивающихся и инклюзивной частиц, а также другие вспомогательные выражения, необходимые для вычисления $\psi(z)$ и z приведены в приложениях 1, 2, 3 диссертации.

Уравнение нормировки

$$\int_0^{\infty} \psi(z) dz = 1 \quad (5)$$

позволяет интерпретировать функцию $\psi(z)$ как плотность вероятности образования частицы с данным значением величины фрактальной меры z , соответствующей рассматриваемому инклюзивному процессу.

В третьей главе приведены результаты анализа экспериментальных данных по инклюзивному рождению π^0 и η^0 мезонов в $p(\bar{p}) + p$ взаимодействиях в рамках концепции z -скейлинга. Описывается построение $\psi(z)$ и z для рассматриваемых процессов. Описаны кинематические диапазоны энергий столкновений $\sqrt{s} = (23 - 540)$ ГэВ, поперечных импульсов $p_T = (1 - 40)$ ГэВ/с и углов вылета $\theta = 5^\circ - 90^\circ$ инклюзивной частицы в исследуемых процессах. Обращается внимание на сильную зависимость спектров нейтральных мезонов от энергии столкновения и угла вылета частиц с ростом поперечного импульса p_T инклюзивной частицы.

Исследуются свойства z -представления анализируемых данных. Установлены энергетическая, угловая независимость и существование двух различных областей в поведении скейлинговой функции $\psi(z)$ (рис. 2 (а,б)). Открыт степенной закон поведения функции $\psi(z) \sim z^{-\beta}$ при больших значениях переменной z . Он рассматривается, как доказательство фрактального характера процесса образования частиц. Существование двух различных областей в поведении скейлинговой функции является проявлением мягкого (область малых z) и жесткого (степенное поведение $\psi(z)$ при $z > 4$) процесса образования частиц. Установлено различие величины параметра наклона β скейлинговой функции для π^0 мезонов в $p + p$ и $\bar{p} + p$ столкновениях ($\beta_{pp}^{\pi^0} = 7.30 \pm 0.28$, $\beta_{\bar{p}p}^{\pi^0} = 5.75 \pm 0.04$): Полученный результат указывает на разные, но имеющие сходные свойства, механизмы рождения π^0 мезонов в данных столкновениях.

Энергетическая независимость и степенное поведение ψ для инклюзивного рождения нейтральных мезонов в $p + p$ столкновениях подтверждается новыми экспериментальными данными при энергии столкновения $\sqrt{s} = 200$ ГэВ, полученными на RHIC [4, 5], (рис. 2 (в)).

Установленные свойства z скейлинга позволяют предсказывать спектры нейтральных мезонов в $p(\bar{p}) + p$ взаимодействиях при энергиях RHIC, Tevatron и LHC.

На рис. 2 (г) приведены инклюзивные спектры π^0 мезонов в $p + p$ взаимодействиях при энергиях $\sqrt{s} = 200, 500$ ГэВ. Показывается возможность использования z -скейлинга для поиска новых физических закономерностей, проявление которых будет выражаться в изменении наклона скейлинговой функции в области ее асимптотического поведения (при $z > 4$).

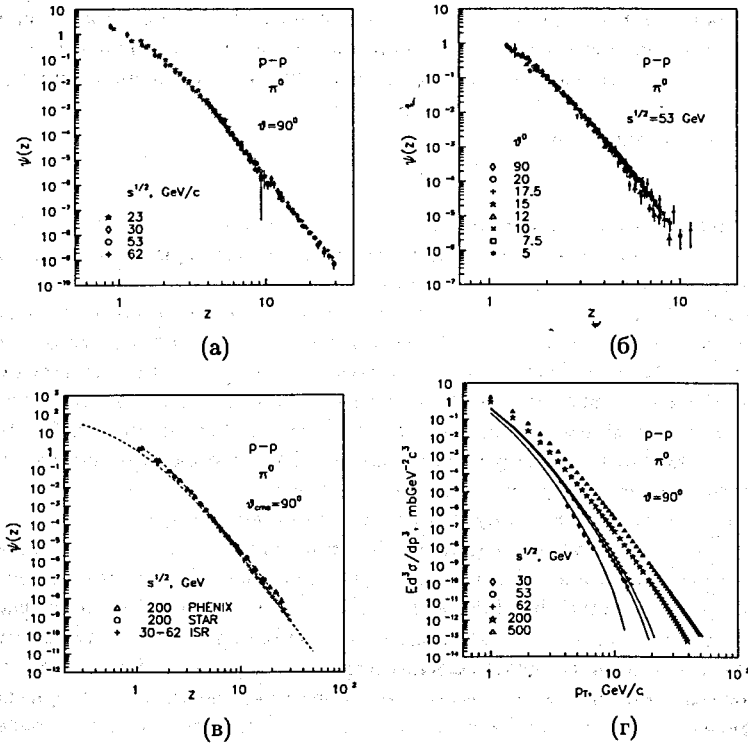


Рис. 2: Зависимость скейлинговой функции $\psi(z)$ от z для инклюзивного рождения π^0 мезонов в $p + p$ столкновениях при энергии $\sqrt{s} = (23 - 62)$ ГэВ и угле $\theta = 90^\circ$ [2](а), энергии $\sqrt{s} = 53$ ГэВ и угле $\theta = 5^\circ - 90^\circ$ [3] (б), энергии $\sqrt{s} = (30 - 200)$ ГэВ и $\theta = 90^\circ$ [2] - [5] (в). Зависимость сечения рождения π^0 мезонов в $p + p$ столкновениях от поперечного импульса p_T (г). Символы \ast , Δ и сплошные линии - предсказания сечений для различных энергий, полученные на основе z скейлинга. Экспериментальные данные обозначены символами \diamond , \circ и $+$ [2].

В четвертой главе приведены результаты анализа в рамках концепции z скейлинга данных по инклюзивному рождению π^0 мезонов в $p + A$ взаимодействиях. Описывается построение скейлинговой функции $\psi(z)$ и переменной z . Определяют-

ся аномальные фрактальные размерности ядер $\delta_A = \delta_N A$ (δ_N - фрактальная размерность нуклона) и преобразование $z \rightarrow \alpha z$, $\psi \rightarrow \alpha^{-1} \psi$, позволяющее сравнивать скейлинговые функции для различных ядер. Приведено описание анализируемых экспериментальных данных (типы мишеней - Be, C, Al, Cu, Au , кинематические диапазоны измеренных спектров $\sqrt{s} = (19 - 38)$ ГэВ, $p_T = (0.45 - 12)$ ГэВ/с, $\theta = 90^\circ$). Отмечается сильная зависимость инклюзивных сечений от энергии столкновения, которая еще более усиливается с увеличением поперечного импульса регистрируемой инклюзивной частицы.

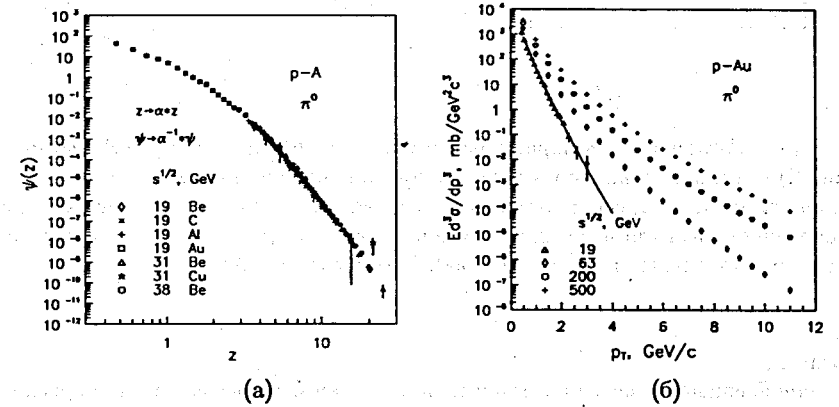


Рис. 3: (а) - Зависимость скейлинговой функции $\psi(z)$ от z для π^0 мезонов, рожденных в $p + A$ взаимодействиях при энергии $\sqrt{s} = (19 - 38)$ ГэВ [6]-[9]. (б) - Инклюзивные сечения рождения π^0 мезонов в $p + Au$ столкновениях в зависимости от поперечного импульса p_T при различных энергиях столкновения $\sqrt{s} = (19 - 500)$ ГэВ и угле регистрации $\theta = 90^\circ$ частицы. Символы \diamond , \circ , $+$ и сплошные линии - предсказания, Δ - экспериментальные данные [7].

Исследуются свойства z представления инклюзивных сечений рождения π^0 мезонов в $p + A$ взаимодействиях при высоких энергиях. Установлена энергетическая независимость скейлинговой функции $\psi(z)$ (рис. 3(а)) и A -зависимость преобразования $z \rightarrow \alpha(A)z$, $\psi \rightarrow \alpha(A)^{-1} \psi$ (рис. 4(а)). Так как коэффициент $\alpha(A)$ не зависит от кинематических переменных, то это является свидетельством самоподобного характера образования частиц в ядерной среде. При больших значениях $z > 4$ обнаруживается указание на асимптотическое поведение $d\beta/dz \rightarrow const$, в то время как при малых значениях z наблюдается изменение параметра наклона β скейлинговой функции. Полученный результат указывает на проявление жесткого ($z > 4$) и мягкого ($z < 4$) режимов в процессе образования π^0 мезонов в протон-ядерных взаимодействиях. Степенное поведение $\psi(z)$ указывает на фрактальный характер образования частиц при больших z , соответствующих большому поперечному им-

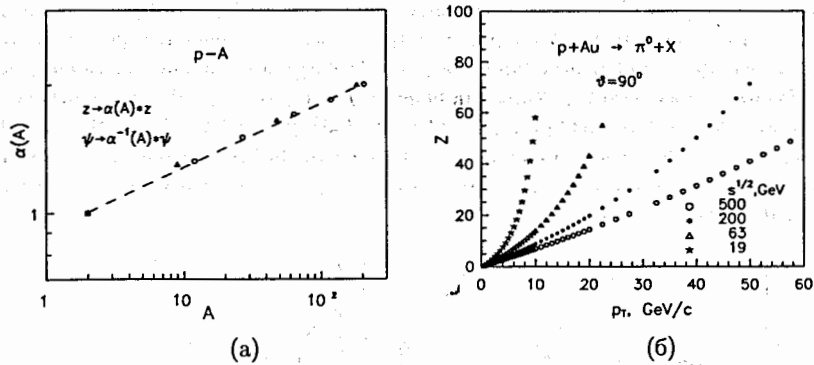


Рис. 4: (а) - A -зависимость параметра преобразований $\alpha(A)$ для $p + A$ взаимодействий. Пунктирная линия получена фитом данных для заряженных ($\circ - h^\pm$) [1] адронов, символы Δ , соответствуют π^0 мезонам. (б) - Зависимость переменной z от поперечного импульса p_T для π^0 мезонов, рожденных в $p + Au$ столкновениях при различных энергиях $\sqrt{s} = (19 - 500)$ ГэВ и угле $\theta = 90^\circ$.

пульсам p_T .

Установленные свойства скейлинговой функции использованы для проведения предсказательных расчетов спектров π^0 мезонов в $p + A$ взаимодействиях при энергиях RHIC, которые представляют интерес для сравнения с будущими экспериментальными данными. На рис. 3(б) приведены импульсные спектры π^0 мезонов в $p + Au$ взаимодействиях в диапазоне энергий $\sqrt{s} = (63 - 500)$ ГэВ.

Обсуждается возможное нарушение z -скейлинга в протон-ядерных взаимодействиях, которое будет выражаться в изменении значения аномальной фрактальной размерности ядер δ_A и наклона скейлинговой функции в области ее асимптотического поведения. Возможные нарушения могут рассматриваться как указания на новые физические закономерности, такие как фазовые переходы адронной и ядерной материи, подавление рождения частиц с большими поперечными импульсами в ядерной среде. Предложена объединенная кинематическая и динамическая зависимость ($z - p_T$ зависимость) (рис. 4(б)) для выбора области, где поиск нарушения z скейлинга наиболее оптимален. Результаты анализа экспериментальных данных указывают на существование скейлинга вплоть до $z = 20$.

В пятой главе приведены и обсуждаются результаты анализа экспериментальных данных по рождению струй в $p(\bar{p}) + p$ взаимодействиях на коллайдерах ISR, SpS и Tevatron в рамках z скейлинга. Описывается построение скейлинговой функции $\psi(z)$ и переменной z .

Описана кинематическая область исследуемых спектров струй - $\sqrt{s} = (38 - 1960)$ ГэВ, $p_T = (5 - 500)$ ГэВ/с и $|\eta| < 3$. Отмечается зависимость сечения струй от энергии \sqrt{s} и псевдобыстроты η усиливающаяся с ростом поперечной энергии струи.

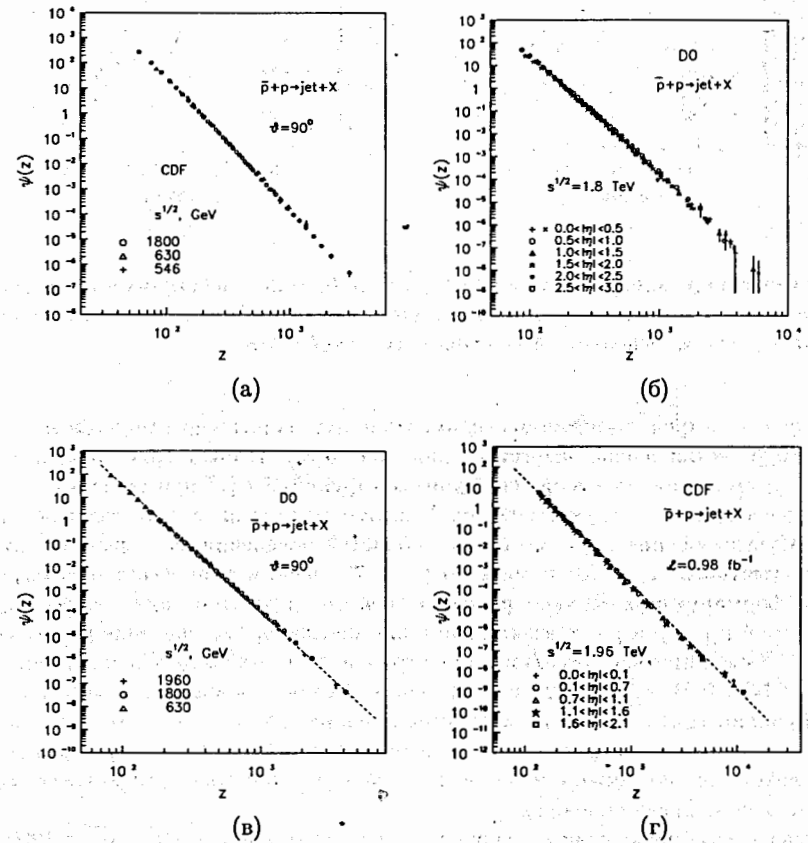


Рис. 5: Зависимость скейлинговой функции $\psi(z)$ от z для инклюзивного рождения струй в $\bar{p} + p$ столкновениях при энергиях $\sqrt{s} = 546, 630, 1800$ ГэВ и $\theta = 90^\circ$ [10, 11] (а), при энергии $\sqrt{s} = 1800$ ГэВ и $|\eta| < 3$ [12] (б), при энергии $\sqrt{s} = 630, 1800, 1960$ ГэВ и $\theta = 90^\circ$ [11] (в), при энергии $\sqrt{s} = 1960$ ГэВ и $|\eta| < 2.1$ [13] (г). Пунктирные линии - результат фита данных степенной функцией, $\psi(z) = a_0 \cdot z^{-\beta}$

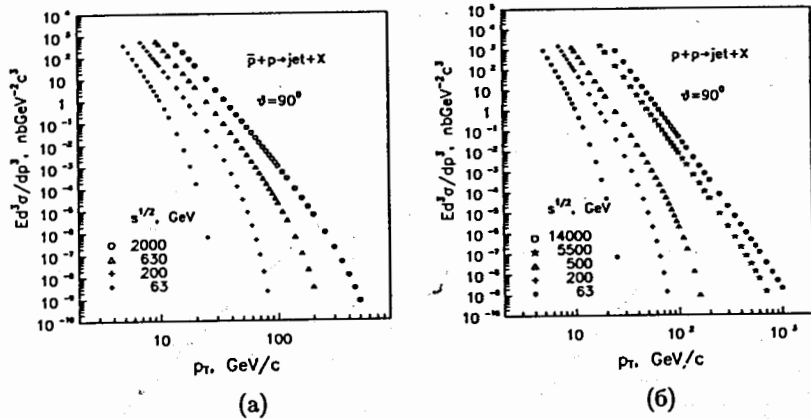


Рис. 6: Сечения рождения струй в $\bar{p}+p$ (а) и $p+p$ (б) взаимодействиях в зависимости от поперечного импульса p_T для различных энергий \sqrt{s} и угле $\theta=90^\circ$. Точки - результат расчета, основанный на свойствах z скейлинга. \checkmark

Получено z -представление экспериментальных данных по импульсным спектрам струй. Установлены энергетическая (рис. 5(а)), угловая (рис. 5(б)) независимость и степенное поведение скейлинговой функции $\psi(z)$ при больших z . Степенная зависимость $\psi(z)$ указывает на фрактальный характер процесса рождения струй. Существование двух различных областей поведения $\psi(z)$ является отражением жесткого ($z > 70$) и мягкого ($z < 70$) режимов процесса образования частиц, формирующих струю. Сравнение свойств z представления процесса рождения струй в $p+p$ и $\bar{p}+p$ взаимодействиях показало, что значение параметров наклона β скейлинговой функции для струй в этих взаимодействиях различны ($\beta_{pp}^{jet} = 5.95 \pm 0.21$, $\beta_{\bar{p}p}^{jet} = 5.26 \pm 0.12$). Как и в случае рождения π^0 мезонов, наклон функции $\psi(z)$ в $p+p$ взаимодействиях больше, чем в $\bar{p}+p$. Этот результат указывает не только на различие в механизмах рождения струи в $p+p$ и $\bar{p}+p$ взаимодействиях, но также и на сходство свойств механизма формирования струи (самоподобие и фрактальность).

Экспериментальные данные, полученные на Tevatron при энергии $\sqrt{s} = 1960$ ГэВ, позволяют провести проверку установленных свойств z скейлинга для рождения струй в $p(\bar{p})+p$ взаимодействиях, установленных ранее при меньших энергиях. На рис. 5(в,г) представлены новые данные коллабораций CDF и D0 по сечениям рождения струй в z представлении, подтверждающие энергетическую, угловую независимость и степенное поведение скейлинговой функции $\psi(z)$.

Установленные скейлинговые закономерности инклюзивного рождения струй позволили предсказать спектры струй в $p(\bar{p})+p$ взаимодействиях в различных

кинематических диапазонах при энергиях RHIC, Tevatron и LHC.

Результаты предсказаний показаны на рис. 6(а,б). В данной главе обсуждается также возможность нарушения z -скейлинга, вследствие проявления новых физических явлений, таких как фазовый переход адронной материи. Предполагается, что такое нарушение будет проявляться в изменении наклона скейлинговой функции $\psi(z)$ в области ее асимптотического поведения при больших значениях z .

В шестой главе представлены результаты Монте Карло анализа рождения струй в $p+p$ взаимодействиях при энергии $\sqrt{s} = 200$ ГэВ. Описан механизм генерации струй в программе RYTHIA. Показано влияние внутренних параметров программы на поперечные спектры частиц и описан метод корректировки данного влияния на распределений событий по поперечной энергии струи. В качестве параметров алгоритма реконструкции струи используются следующие величины: E_{seed} - энергия инициатора струи, E_{cut} - минимальная энергия струи и R - радиус струи в пространстве η, ϕ . Приводится описание конусного алгоритма реконструкции струй, воспроизводящего основные шаги D0-экспериментального алгоритма и учитывающего возможность перекрытия многих струй.

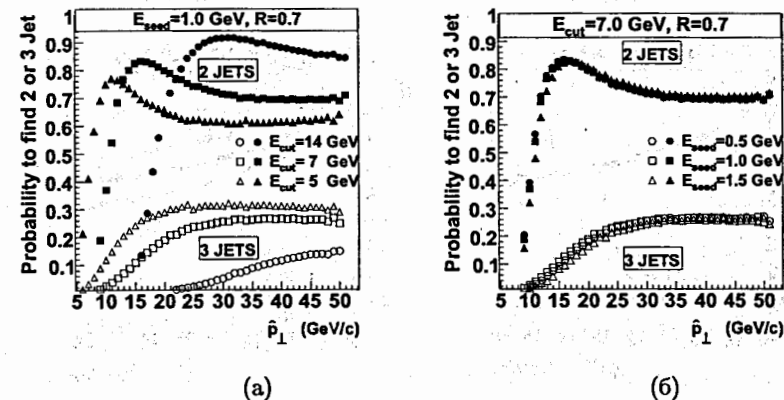


Рис. 7: Зависимость вероятности выделения двух или трех струй от поперечного импульса жесткого процесса $p_{\perp 1}$ для различных значений E_{cut} (а), E_{seed} (б).

Исследовано влияние значений параметров алгоритма на зависимость вероятности реконструкции N -струй в событии и их характеристики от поперечного импульса жесткого процесса $p_{\perp 1}$. Установлено, что параметр $E_{seed} = (0.5 - 1.5)$ ГэВ не влияет на вероятность выделения двух и трех струй в событии, а параметры E_{cut} , R изменяют тип реконструированных событий (1, 2, ..., N -струйные).

На рис. 7 приводятся зависимости вероятности выделения двух и трех струй от параметров E_{seed} (рис. 7(а)) и E_{cut} (рис. 7(б)). Показано, что точность восстановления двумя лидирующими струями (в N -струйных событиях) поперечного

импульса P_T^{Part} и направления жестко рассеянного партона не зависит от параметра алгоритма E_{cut} при $R=0.7$ (рис. 8(а,б)) и чувствительна к величине параметра R (рис.8(в,г)). Для характеристики точности восстановления поперечного импуль-

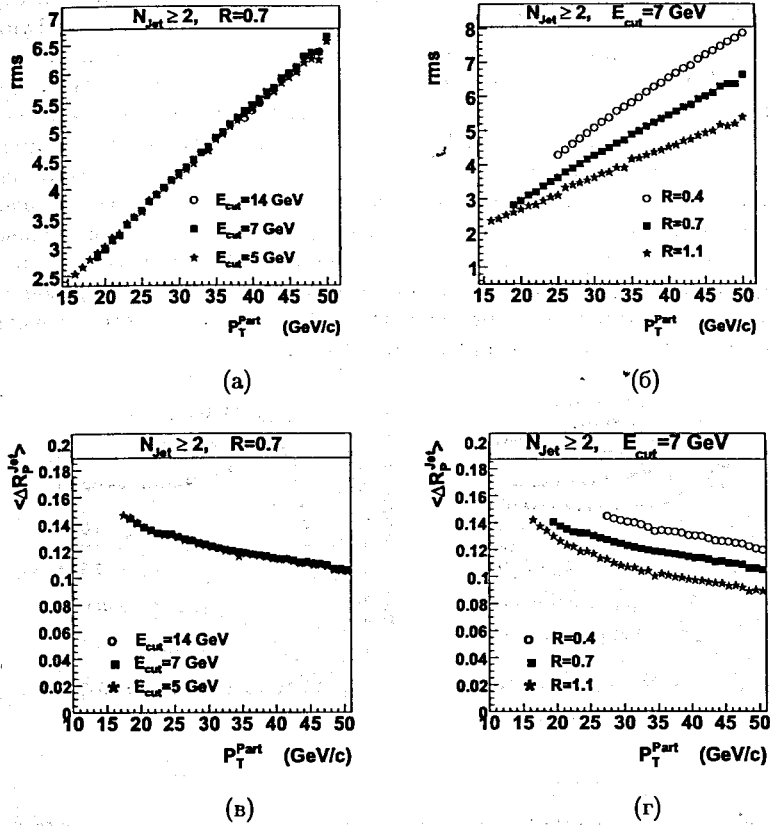


Рис. 8: Зависимость rms и $\langle \Delta R_{Part}^{Jet} \rangle$ от P_T^{Part} для двух лидирующих струй в N -струйных событиях при различных значениях E_{cut} (а,в) и R (б,г).

са партона P_T^{Part} используется ширина распределения rms количества событий по поперечной энергии струи E_T^{Jet} для узкого диапазона значений P_T^{Part} как функция P_T^{Part} (рис. 8(а,в)). Среднее отклонение оси струи от направления соответствующего жестко рассеянного партона $\langle \Delta R_{Part}^{Jet} \rangle$ как функция P_T^{Part} (рис. 8(б),г)) выбрано для определения точности восстановления направления партона.

В данной главе исследовано влияние параметров алгоритма на сечение рождения струй в p_T и z представлениях. Показано, что спектры струй зависят от

параметров алгоритма реконструкции струй в области $E_T^{Jet} < 25$ ГэВ. На рис. 9(а) приведена зависимость отношения $(Jet_{Par2} - Jet_{Par1})/Jet_{Par1}$ сечений рождения струй от E_T^{Jet} , реконструированных при использовании наборов параметров PAR1 и PAR2 (PAR1: $E_{cut}=7$ ГэВ, $E_{seed}=1$ ГэВ, $R=0.7$; PAR2: $E_{cut}=5$ ГэВ, $E_{seed}=0.5$ ГэВ, $R=0.4$). Установлено, что наибольшее отличие сечений проявляется в области, в которой доминируют одноструйные события. На рис. 9(б) представлено отношение Jet_N/Jet_{All} сечений рождения N -струйных событий к полному сечению в зависимости от E_T^{Jet} .

Проведено сравнение экспериментальных данных по сечениям рождения струй, полученных коллаборацией STAR [14], и результатами моделирования программой PYTHIA. Получено хорошее согласие экспериментальных данных с результатами проведенного анализа (рис. 9(в)). Результаты исследования z представления показали независимость величины наклона β функции $\psi(z)$ в области $E_T^{Jet} = 25 - 60$ ГэВ (рис. 9(г)). Однако проверка асимптотического поведения скейлинговой функции в области больших z с использованием данных RHIC показала, что для получения убедительного заключения о величине наклона $\psi(z)$ необходимо измерение спектров струй в области $E_T^{Jet} > 25$ ГэВ с большей статистической обеспеченностью.

В заключении сформулированы основные физические и методические результаты диссертационной работы:

- Проведено обобщение теории z скейлинга на описание инклюзивного рождения нейтральных мезонов и струй. Впервые, используя экспериментальные данные по инклюзивным сечениям рождения, построены скейлинговая функция $\psi(z)$ и переменная z для рождения π^0 мезонов в $p + p(\bar{p}, A)$ взаимодействиях, η^0 мезонов в $p+p$ и струй в $p+p(\bar{p})$ столкновениях. Подтверждены результаты по скейлинговым закономерностям рождения заряженных адронов в $p + p(A)$ столкновениях.

- Установлены свойства z представления экспериментальных данных для рассматриваемых процессов - энергетическая, угловая независимость и существование двух областей различного поведения скейлинговой функции $\psi(z)$. Установлено степенное поведение функции $\psi(z) \sim z^{-\beta}$ при больших значениях z и отклонение от данной зависимости в области малых z . Полученный результат интерпретируется как проявление жесткого и мягкого режима процесса образования частиц (струй). Степенной характер функции $\psi(z)$ согласуется с идеей о фрактальном характере процесса рождения частиц (струй). С уменьшением величины фрактальной меры z уменьшается разрешение, при котором структура элементарного столкновения может быть выделена из рассматриваемого взаимодействия. В настоящее время есть основания предполагать, что это общее свойство образования частиц при больших z . Поэтому экспериментальная проверка установленной закономерности представляет значительный интерес для развития моделей описывающих рождение частиц. Установлено отличие параметров наклона β скейлинговой функции $\psi(z)$ для π^0 мезонов и струй в $p + p$ и $\bar{p} + \bar{p}$ столкновения ($\beta_{pp} > \beta_{\bar{p}\bar{p}}$). Этот результат свидетельствует о существенном различии подпроцессов инициирующих рождение частиц (струй) на малых масштабах. Установлена A -зависимость преобразования $z \rightarrow \alpha(A)z$, $\psi \rightarrow \alpha^{-1}(A)\psi$, используемого при сравнении функций

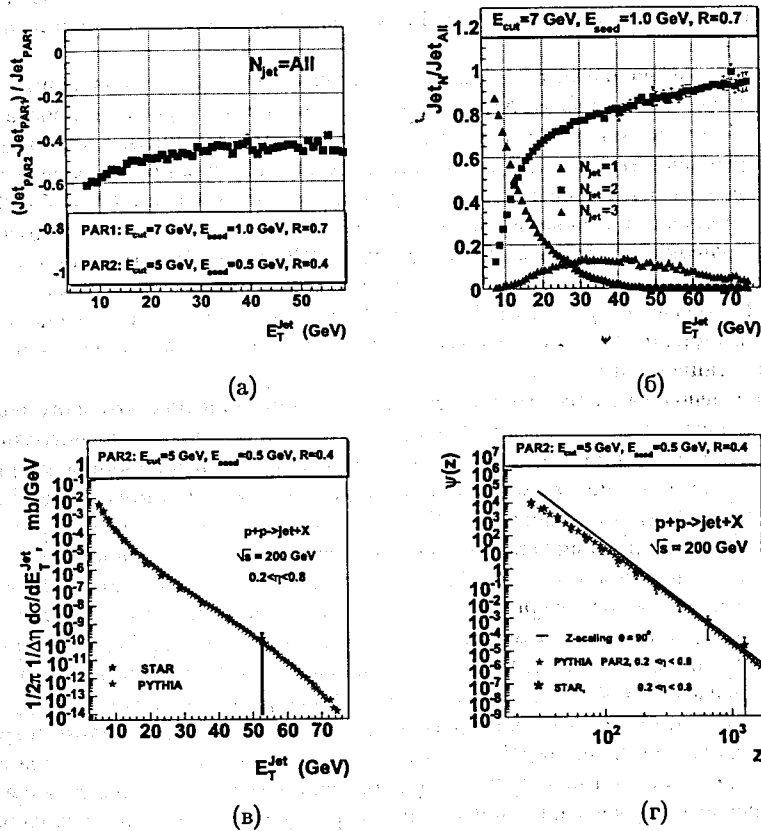


Рис. 9: Зависимость отношения $(Jet_{Par2} - Jet_{Par1})/Jet_{Par1}$ инклюзивных сечений рождения струй от E_T^{Jet} (а). Отношение Jet_N/Jet_{All} сечений N -струйных событий к полному сечению в зависимости от E_T^{Jet} (б). Зависимость инклюзивных сечений струй от поперечной энергии струи E_T^{Jet} (в). Зависимость скейлинговой функции $\psi(z)$ от переменной z . Символы * - экспериментальные данные, полученные коллаборацией STAR [14] (г).

$\psi(z)$ для различных ядер. Полученный результат, поддерживает гипотезу о самоподобном характере влияния ядерной среды на механизм формирования частиц с большими поперечными импульсами.

- На основе установленных свойств z -скейлинга предсказаны импульсные спектры π^0 мезонов в $p+p$, $\bar{p}+p$ и $p+A$ взаимодействиях; спектры η^0 мезонов $p+p$ и струй в $p+p$ и $\bar{p}+p$ столкновениях.

- На основе экспериментальных данных RHIC получено подтверждение энергетической независимости скейлинговой функции и ее степенного поведения для π^0 мезонов в $p+p$ взаимодействиях вплоть до энергии столкновения 200 ГэВ и поперечного импульса 20 ГэВ/с. Данные по рождению струй на Tevatron при энергии 1960 ГэВ подтвердили энергетическую, угловую независимости и степенное поведение скейлинговой функции $\psi(z)$ при больших значениях z для рождения струй в $\bar{p}+p$ взаимодействиях.

- Установлена принципиальная возможность поиска и изучения новых физических закономерностей, таких как фазовый переход адронной и ядерной материи и др., проявляющихся в нарушении установленных скейлинговых закономерностей. Изменение параметра наклона β скейлинговой функции $\psi(z)$ в области ее асимптотического поведения и значения фрактальной размерности ядер δ_A могут служить количественной характеристикой нарушения z -скейлинга. Предложена объединенная кинематическая и динамическая зависимость ($z - p_T$ -зависимость) для выбора области, где поиск возможного нарушения z скейлинга оптимален.

- Исследовано влияние параметров конусного алгоритма реконструкции струй на количество выделяемых в событии струй и их характеристики. Показано, что параметр $E_{seed} = (0.5 - 1.5)$ ГэВ не влияет, а параметры E_{cut} , R изменяют тип реконструированных событий (1-, 2-, ... N -струйные). Установлено, что точность восстановления двумя лидирующими струями (в N -струйных событиях) поперечного импульса и направления жестко рассеянного партона не зависит от параметра E_{cut} при $R = 0.7$ и чувствителен к величине R . Данные характеристики для двухструйных событий зависят как от E_{cut} , так и R .

- Установлена зависимость сечений рождения струй в $p+p$ взаимодействиях при $\sqrt{s} = 200$ ГэВ в области $E_T^{Jet} < 25$ ГэВ в p_T и z представлениях от параметров конусного алгоритма. Для двухструйных событий эта область уменьшается до $E_T^{Jet} < 15$ ГэВ. Показано отсутствие влияния параметров алгоритма на наклон β скейлинговой функции в диапазоне $E_T^{Jet} = (25 - 60)$ ГэВ. Для более точной проверки асимптотического поведения скейлинговой функции $\psi(z)$ при энергии 200 ГэВ на RHIC необходимо увеличение статистики экспериментальных данных в диапазоне $E_T^{Jet} > 25$ ГэВ.

Список публикаций

- [1] M.V. Tokarev and T.G. Dedovich: z-Scaling and Jet production in hadron-hadron collisions at high energies *Int. J. Mod. Phys. A* **15**, 3495 (2000).
- [2] M.V. Tokarev, O.V. Rogachevski and T.G. Dedovich: Scaling Features of π^0 -meson production in high-energy $p + p$ -collisions. *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **26**, 1671 (2000).
- [3] M.V. Tokarev, O.V. Rogachevski and T.G. Dedovich: A-dependence of π^0 -meson production in proton-nucleus and nucleus-nucleus collisions at high energy. *JINR Commun.* E2-2000-90, 2000 (Dubna).
- [4] M.V. Tokarev and T.G. Dedovich: z-Scaling of Jet production at the Tevatron. Preprint JINR-E2-2004-188, 2004 (Dubna); *Proceeding of the XVII International Seminar on High Energy Physics Problems (ISHEPP XVII): Relativistic nuclear physics and quatum chromodynamics vol. II, 173. Editors: A.N. Sissakian, V.V. Burov, A.I. Malakhov.*
- [5] Т.Г. Дедович и М.В. Токарев: Влияние параметров конусного алгоритма на эффективность и характеристики реконструированных струй в $p + p$ -взаимодействиях при энергии $\sqrt{s} = 200$ ГэВ. *Письма в ЭЧАЯ* **4**, 4, 140 (2007); Preprint JINR-P2-2006-108, 2006 (Dubna).
- [6] M.V. Tokarev and T.G. Dedovich: Verification of z-scaling at RHIC and Tevatron. *ЯФ* **68**, 3, 433 (2005).
- [7] T.G. Dedovich and M.V. Tokarev: Jet in $p + p$ collisions at RHIC and MC study of z-scaling. *Proceeding of the XVIII International Seminar on High Energy Physics Problems (ISHEPP XVIII, Dubna, Russia, September 25-30, 2006)*, arXiv:0708.2465v1 [hep-ph].
- [8] M.V. Tokarev, I. Zborovsky and T.G. Dedovich: z-Scaling at RHIC and Tevatron. *Proceeding of the XVIII International Seminar on High Energy Physics Problems (ISHEPP XVIII, Dubna, Russia, September 25-30, 2006)*, arXiv:0708.2464v1 [hep-ph].

Литература

- [1] M.V. Tokarev et al., *Int. J. Mod. Phys. A* **16**, 1281 (2001).
- [2] A.L.S. Angelis et al., *Phys. Lett B* **79**, 505, (1978).
- [3] D. Lloyd Owen et al., *Phys. Rev. Lett* **45**, 89 (1980).
- [4] H. Buesching (PHENIX Collab.) *Hot Quark06*, May 15-20, 2006, Sardinia, Italy.
- [5] D.Relyea (STAR Collab.) *RHIC & AGS Annual User Meeting*, June 8-9, 2006, BNL.
- [6] J. Povlis et al., *Phys. Rev. Lett* **51**, 967 (1983).
- [7] R. Albrecht et al. (WA80 Collab.), *Z. Phys. C* **47**, 367 (1990).
- [8] G. Alverson et al. (E706 Collab.), *Phys. Rev. D* **48**, 5 (1993).
- [9] L. Apanasevich et al. (E706 Collab.), *Phys. Rev. Lett.* **81**, 2642 (1998).
- [10] F. Abe et al. (CDF Collab.), *Phys. Rev. Lett.* **70**, 1376 (1993).
- [11] B. Abbott et al. (D0 Collab.), *Phys. Rev. D* **64**, 032003 (2001).
- [12] D. Elvira (D0 Collab.), *PhD. Thesis* Universidad de Buenos Aires, Argentina (1995).
- [13] M. D'Onofrio (CDF, D0 Collab.), *XX Rencontres dePhysique de la Vallee D'Aoste*; <http://www.pi.infn.it/lathuile/2006/Programme.htm>.
- [14] M.L. Miller (for the STAR Collab.), *e-Print Archive* hep-ex/0604001.

Получено 10 сентября 2007 г.