

на правах рукописи



Иванов Алексей Евгеньевич

**Ядерные эффекты в жестких взаимодействиях
адронов и лептонов с ядрами**

Специальность 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Бердников Ярослав Александрович

Официальные оппоненты: **Рябов Виктор Германович**
доктор физико-математических наук, ФГБУ Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова, НИЦ Курчатовский институт, в.н.с. лаборатории релятивистской ядерной физики

Феофилов Григорий Александрович

кандидат физико-математических наук, доцент, НИИ физики им. В.А. Фока физического факультета ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургского государственного университета, заведующий лабораторией физики сверхвысоких энергий

Ведущая организация: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Защита состоится « 19 » декабря 2012 года в 16 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.229.29 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу:

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 29, главное здание, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан « » ноября 2012 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.229.29

кандидат физико-математических наук

доцент



Ермакова Наталья Юрьевна

Актуальность темы диссертации

Процесс перехода кварков и глюонов в адроны – адронизация, является наиболее интересной частью непертурбативной квантовой хромодинамики (КХД). Использование ядер в качестве мишеней в соударениях с частицами высоких энергий позволяет обнаружить важные особенности пространственно-временной картины адронизации, включающей длину формирования адронов, энергетические потери налетающих и образовавшихся частиц, многократные мягкие перерассеяния, изменение структурных функций внутриядерных нуклонов и др.

Понимание процесса распространения кварков в ядерной среде важно для физической интерпретации данных экспериментальных исследований столкновений, как ультррелятивистских тяжелых ионов для поиска новых состояний кварк-глюонной материи, так и протонов и лептонов с ядрами при высоких энергиях.

Для анализа данных экспериментальных исследований столкновений частиц с ядрами и планирования будущих экспериментов необходима детальная информация о процессах образования частиц в лептон- и адрон- ядерных соударениях при высоких энергиях. Получить такого рода информацию позволяет Монте-Карло (МК) моделирование изучаемых процессов.

В настоящей работе предложена МК модель жестких лептон-ядерных и адрон-ядерных соударений. В работе рассматриваются такие эффекты, как мягкие перерассеяния и энергетические потери налетающих и образующихся адронов, а также составляющих их кварков. В работе используется модель адронизации с двумя стадиями, реализованная в МК генераторе HARDPING (HARD Probe INteraction Generator). Первая – пертурбативная, в которой кварк, рожденный в жестком процессе, распространяется через ядро с пренебрежимо малым сечением взаимодействия. На этой стадии кварк теряет энергию за счет излучения глюонов, описываемого пертурбативной КХД (аналог эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала в квантовой электродинамике). Вторая стадия – непертурбативная, на этой стадии потери энергии анализируются с использованием

модели струн, созданной Т. Съёстрандом и др. [J. High Energy Phys. – 2006. – Vol. 0605. – P. 026–599].

Работа поддержана в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 - 2013 годы.

Цели диссертационной работы

Основной целью диссертационной работы является исследование процесса образования адронов в жестких адрон-ядерных и лептон-ядерных взаимодействиях при высоких энергиях с использованием созданной МК модели HARDPING.

Задачи диссертационной работы

Задачами диссертационной работы являются:

- разработка Монте-Карло генератора жестких столкновений лептонов и адронов с ядрами с учетом, как мягких многократных перерасеяний и соответствующих энергетических потерь налетающих и образовавшихся адронов, так и длины формирования адронов и составляющих их кварков.

- исследование отношений сечений рождения лептонных пар в жестких адрон-ядерных взаимодействиях.

- исследование зависимости отношения дифференциальных сечений рождения адронов в процессе глубоконеупругого рассеяния лептонов на ядрах.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые:

1. Показано, что мягкие перерасеяния и энергетические потери образовавшихся адронов и составляющих их кварков, а также длина их формирования, играют определяющую роль в процессе глубоконеупругого рассеяния лептонов на ядрах. Созданная МК модель, учитывающая перечисленные выше эффекты, позволяет описать имеющиеся экспериментальные отношения дифференциальных сечений рождения адронов на различных ядрах, как функции квадрата поперечного импульса адрона, энергии переданной лептоном кварку и доли энергии, переданной лептоном кварку, а затем образовавшемуся адрону.

2. Показано, что мягкие перерасеяния и энергетические потери кварков налетающего адрона играют важную роль в процессе Дрелла-Яна на ядрах.

Учет этих эффектов позволяет описать имеющиеся экспериментальные отношения дифференциальных сечений рождения лептонных пар на различных ядрах, как функции поперечного импульса пары.

3. Созданная МК модель, учитывающая многократные мягкие неупругие перерассеяния, энергетические потери и длину формирования адронов и составляющих их кварков, позволила определить значение удельных потерь энергии, величина которых составила 1,7 ГэВ/фм.

Научная и практическая ценность

Полученные результаты рекомендуется использовать при анализе экспериментальных данных и поиске новых физических явлений, на существующих в настоящее время и планируемых в будущем крупнейших ускорителях мира:

- CERN: эксперименты CMS, ATLAS и ALICE на большом адронном коллайдере (БАК);
- FNAL: эксперименты с инжекторными протонными пучками с ядерными мишенями;
- BNL: эксперименты по столкновению релятивистских ядер PHENIX, STAR, PHOBOS и BRAHMS на ускорителе RHIC;
- GSI: планирующиеся эксперимент CBM, PANDA и NUSTAR на строящемся ускорителе FAIR;
- ИФВЭ: эксперименты с пучками ядер ускорителя У-70
- ОИЯИ: эксперименты на существующем ускорителе NUCLOTRON и на планируемом ядро-ядерном коллайдере NICA

Основные положения, выносимые на защиту

1. Учет энергетических потерь и многократных мягких перерассеяний адронов и составляющих их кварков до жесткого взаимодействия позволяет описать отношения сечений рождения лептонных пар в процессе Дрелла-Яна на ядрах для различных ядер, как функцию поперечного импульса и доли 4-е импульса налетающего протона, которую несет партон.

2. Учет энергетических потерь, многократных мягких перерассеяний и длины формирования адронов после жесткого взаимодействия позволяет описать отношения выходов частиц, образовавшихся в результате глубоконеупругого рассеяния заряженных лептонов на различных ядрах в зависимости от квадрата поперечного импульса, энергии переданной лептоном кварку и доли этой энергии, унесенной образовавшимся адроном.

3. Величина удельных потерь энергии кварков налетающих адронов в ядерной среде в случае процесса рождения лептонных пар (Дрелл-Ян) и в процессах рождения адронов в глубоконеупругом рассеянии заряженных лептонов на ядрах составляет 1,7 ГэВ/фм и не зависит от начальной энергии адронов, что позволяет описать существующие экспериментальные данные.

4. Создана МК модель адронизации в ядерной среде, учитывающая эффект Ландау-Померанчука-Мигдала в КХД, связанный с тем, что кварк, образовавшийся в жестком процессе, испускает глюоны не из точки жесткого взаимодействия, а с некоторого отрезка (длины формирования). Показано, что Монте-Карло модель учитывающая этот эффект описывает экспериментальные данные по отношению выходов адронов, рожденных в лептон-ядерных столкновениях.

Публикации

По результатам настоящей диссертационной работы опубликовано четыре печатные работы [1, 2, 3, 4] в журналах, включенных в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, рекомендованные Высшей аттестационной комиссией («Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета», Nuclear Physics В Proceeding Supplement, журнал «Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики»).

Апробация работы

Автором представлены результаты диссертационной работы на конференции «Hadron Structure 2011» (Штрба, Словакия), научной сессии-конференции секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодей-

ствий» (Москва, 2011), конференции «Hadron Structure and Quantum Chromodynamics» (Гатчина, 2012)

Содержание и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем диссертации составляет 105 страниц машинописного текста, в том числе 50 рисунков. Список литературы содержит 65 наименований.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы проведенного исследования, сформулированы цели диссертации. Показана научная новизна и практическая ценность результатов диссертационной работы. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Дано краткое изложение содержания её разделов.

Первая глава носит обзорный характер. Она содержит обзор современной литературы по теме диссертационной работы. Содержит описание основных изучаемых процессов. Описаны наиболее распространенные модели рождения частиц в адрон-ядерных столкновениях, а также глубоконеупругого рассеяния заряженных лептонов на ядрах, описаны их достоинства и недостатки.

В ней описаны процессы, которые дают основной вклад в спектры частиц, рождающихся в жестких адрон-ядерных и лептон-ядерных соударениях. Приведены реакции, которые будут использоваться в данной работе, как для определения параметров модели, так и демонстрации работы созданной Монте-Карло модели жестких лептон-ядерных и адрон-ядерных соударений. Это реакции глубоконеупругого рассеяния лептонов на ядрах, реакция Дрелла-Яна на ядрах с образованием лептонных пар и процесс рождения адронов в жестких адрон-ядерных соударениях. Выделение реакции Дрелла-Яна с рождением лептонной пары и процессов глубоконеупругого рассеяния лептонов на ядрах с рождением адронов позволяет отдельно изучать процессы взаимодействия адронов и составляющих их кварков с ядерной средой в начальном состоянии (до жесткого рассеяния) и процессы образования адронов и составляющих их кварков, а также прохождение их через ядро в конечном состоянии (после жесткого

рассеяния). Также в этой главе приведены наиболее распространенные модели, изучаемых процессов.

Во второй главе приведены основные модели рождения адронов в жестких процессах, особое внимание уделено процессу адронизации, приведены преимущества и недостатки этих моделей. Описана Монте-Карло модель адронизации, созданная в рамках данной работы. Показано отличие в длине формирования и приведены расчеты длины формирования для различных моделей.

В этой главе более подробно описан процесс адронизации и формирования адронов, в частности рассматривается эффект Ландау-Померанчука-Мигдала в КХД, который связан с тем, что кварк, образовавшийся в жестком процессе, испускает тормозные глюоны не из точки жесткого процесса, а с некоторого отрезка – длины формирования. Пока кварк не пройдет этот путь он является почти точечной частицей и имеет пренебрежимо малое сечение взаимодействия с ядерной средой и, следовательно, проходит через ядро не взаимодействуя. В зависимости от кинематики, формирование адронов и составляющих их кварков может завершаться, как внутри ядра, так и за его пределами.

В этой главе приведены основные модели, позволяющие рассчитать длину формирования. Это подход, основанный на методах пертурбативной КХД, в котором эффекты непертурбативной КХД сильно упрощены, и подход, основанный на модели фрагментации струн Лундского университета, в котором учтены эффекты непертурбативной КХД, но не учитываются эффекты на пертурбативное излучение на ранних стадиях адронизации. В этих подходах используется модель адронизации, состоящая из двух стадий. На первом этапе, в результате разрыва струны, формируется бесцветное состояние - пред-адрон (цветовой диполь), предшественник конечного адрона, сечение взаимодействия которого с нуклонами ядра, вообще говоря, неизвестно. На втором этапе из этого пред-адрона формируется конечный наблюдаемый адрон h .

В первом подходе потери энергии на пертурбативное излучение, следуя работам Копелёвича Б.З. и др. [5, 6], могут быть записаны в следующем виде:

$$\Delta E_{rad}(t) = \int \frac{Q^2}{\lambda^2} dk_T^2 \int_0^1 d\alpha \nu \alpha \frac{dn_g}{d\alpha dk_T^2} \Theta(t - t_c) \Theta(1 - z_h - \alpha), \quad (1)$$

Тогда выражение для вероятности сформировать пре-адрон имеет виде:

$$W(t, z_h, Q^2, \nu) = N \int_0^1 \frac{d\alpha}{\alpha} \delta \left[z_h - \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{E_q(t)}{\nu} \right] \times \int_{\Lambda^2} \frac{dk_T^2}{k_T^2} \frac{\exp(-t/t_c)}{t_c} \int dl_T^2 \delta \left[l_T^2 - \frac{9}{16} k_T^2 \right] \int_0^1 d\beta \delta \left[\beta - \frac{\alpha}{2 - \alpha} \right] |\Psi_h(\beta, l_T)|^2 S(z_h, t, Q^2, \nu) \quad (2)$$

здесь $E_q(t)$ - зависимость энергии кварка от времени, $\Psi_h(\beta, l_T^2)$ - волновая функция мезона, S - фактор Судакова:

$$S(t, z_h, Q^2, \nu) = \exp[-\tilde{n}_G(t, z_h, Q^2, \nu)], \quad (3)$$

$$\tilde{n}_G(t, z_h, Q^2, \nu) = \gamma \int_{1-z_h}^1 \frac{d\alpha}{\alpha} \int_{\Lambda^2} \frac{dk_T^2}{k_T^2} [1 - \exp(-t/t_c)]. \quad (4)$$

Нормировка проводится на функцию фрагментации.

Во втором подходе, развитом в работах Пирнера Г.Дж. и др. [7, 8], плотность вероятности для длины формирования в зависимости от z и L имеет следующий вид:

$$P(y; z, L) = \frac{zL}{y - zL} \left[\frac{y}{(y + zL)(1 - z)} \right]^C \left(\delta[y - (1 - z)L] + \frac{1 + C}{y - zL} \Theta[(1 - z)L - y] \right) \Theta[y] \quad (5)$$

Тогда среднее значение длины формирования в зависимости от z и L запишется в виде:

$$\langle l_p \rangle = \int P(y; z, L) y dy \quad (6)$$

Проводя интегрирование получаем следующее выражение:

$$\langle l_p \rangle = \left[1 + \frac{1 + C}{2 + C} \frac{1 - z}{z^{2+C}} F_1 \left(2 + C, 2 + C, 3 + C, \frac{z - 1}{z} \right) \right] (1 - z) z L \quad (7)$$

здесь F_1 - гипергеометрическая функция.

Для создания Монте-Карло модели адронизации в ядерной среде в рамках создания генератора HARDPING был использован следующий подход. Для учета потерь на пертурбативное излучение использовалась модель партонных ливней Монте-Карло генератора PYTHIA. Длина формирования вычисляется согласно второму подходу, рассмотренному здесь, но уже с учетом пертурбативных потерь энергии кварком на первой стадии.

Зависимость средней длины формирования от z и ν для описанных выше двух подходов и для модели используемой в HARDPING приведены на рисунке 1 [3]. В первом подходе длина формирования может быть вычислена только для адронов с большим z ($z > 0.5$), а при создании Монте-Карло модели лептон- и адрон- ядерных соударений нужно учитывать и адроны, образующиеся с меньшими значениям z . Вследствие этого необходимо было экстраполировать длину формирования, как функцию z .

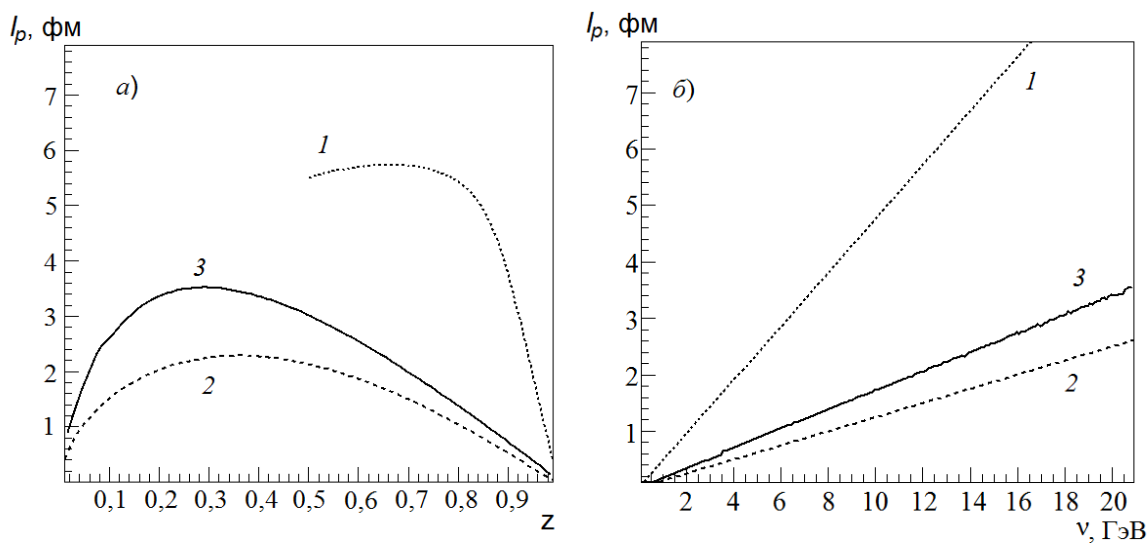


Рисунок 1. Длина формирования составляющего кварка, как функция доли энергии z виртуального фотона, переданной составляющему кварку, который образует конечный адрон (а) и энергии ν виртуального фотона (б), вычисленная с помощью «пертурбативного» подхода (1), с помощью «непертурбативного» подхода (2) и с помощью HARDPING (3).

Из приведенных графиков видно, что длина формирования в первом подходе самая большая из рассмотренных здесь подходов при одинаковых условиях. Кроме того в этой главе, было показано, что первый подход не позволяет описать экспериментальные данные, в частности зависимость отношения множе-

ственностей образовавшихся адронов на ядре криптона к ядру дейтерия в зависимости от z .

В третьей главе описывается создание Монте-Карло генератора HARDPING рождения адронов в жестких лептон-ядерных соударениях. Монте-Карло генератор HARDPING основан на таких популярных генераторах, как PYTHIA и HIJING. В нем учтены такие эффекты, как многократные мягкие перерасеяния и энергетические потери образовавшихся в жестком соударении адронов и составляющих их кварков, а также в МК генераторе HARDPING была создана модель адронизации в ядерной среде, учитывающая длину формирования, как самих адронов, так и составляющих их кварков.

Необходимость учета мягких перерасеяний для описания спектров адронов, рождающихся в жестких соударениях, впервые была показана Е.М. Левиным и М.Г. Рыскиным [9]. Преимуществом глубоконеупругого рассеяния лептонов на ядрах является то, что взаимодействием лептонов с ядром до жесткого соударения можно пренебречь и, следовательно, основной вклад в спектры адронов, образовавшихся в жестком соударении будут давать взаимодействия в конечном состоянии. Также, поскольку известна начальная энергия и импульс налетающего лептона и измеряются энергия и импульс рассеянного лептона, то известна начальная энергия и импульс выбитого из внутриядерного нуклона партон в результате жесткого рассеяния.

Для учета многократного мягкого перерасеяния была создана следующая модель: после жесткого соударения кварк проходит определенную длину — длину формирования пре-адрона. На этой стадии сечение взаимодействия с ядерной средой пренебрежимо мало и считается равным нулю. После прохождения длины формирования пре-адрона, из выбитого партон образуется пре-адрон, который взаимодействует с ядерной средой с сечением взаимодействия меньшим, чем у адрона ($\sim (2/3)\sigma_{hN}$). После прохождения длины формирования адрона, образовавшийся адрон взаимодействует с ядерной средой с сечением взаимодействия σ_{hN} .

После прохождения длины формирования пре-адрона частица может испытывать неупругие многократные мягкие перерассеяния. Для учета этого сначала вычислялась длина свободного пробега до точки мягкого перерассеяния. После чего частица участвует в мягком рассеянии в заданной точке. Для определения поперечного импульса используется следующее распределение по поперечному импульсу:

$$f_p(\mathbf{p}_{ti}) = \frac{B^2}{2\pi} e^{-Bp_{ti}} , \quad (8)$$

$B = \frac{2}{\langle k_q \rangle}$, где $\langle k_q \rangle$ – среднее значение поперечного импульса кварка в адроне.

Так же учтено движение нуклона в ядре, распределение нуклона по поперечному импульсу в ядре имеет следующий вид:

$$f_f(\mathbf{k}_{fi}) = \frac{B_f}{\pi} e^{-B_f k_{fi}^2} , \quad (9)$$

$B_f = \frac{2}{\langle k_f \rangle}$, где $\langle k_f \rangle$ – среднее значение поперечного импульса нуклона в ядре.

Резльтирующее распределение может быть записано в виде свертки:

$$f_{pf}(\mathbf{k}_{ti}) = f_p \otimes f_f = \int f_p(\mathbf{p}_{ti}) f_f(\mathbf{k}_{fi}) \delta^2(\mathbf{k}_{ti} - \mathbf{p}_{ti} - \mathbf{k}_{fi}) d^2 p_{ti} d^2 k_{fi} . \quad (10)$$

Поскольку в жестком столкновении участвуют партоны, то так же учтено распределение по поперечному импульсу партона в составляющем кварке:

$$f_h(\mathbf{k}_h) = \frac{B_h^2}{2\pi} e^{-B_h k_h} , \quad (11)$$

$B_h = 2/\langle k_h \rangle$, $\langle k_h \rangle$ – среднее значение поперечного импульса партона в составляющем кварке.

Для учета энергетических потерь использовалась следующая простая модель: после первого мягкого неупругого рассеяния кварк теряет энергию с постоянной частотой: k ГэВ/фм, где параметр k — определяется из наилучшего согласия с экспериментом.

Созданная модель позволила описать экспериментальные данные по рождению адронов в глубоконеупругом рассеянии лептонов на ядрах, полученные в экспериментах HERMES и EMC. Соответствующие распределения показаны на рисунках 2, 3, 4, 5 [1,2]. Из представленных рисунков видно согласие созданной МК модели с экспериментальными данными.

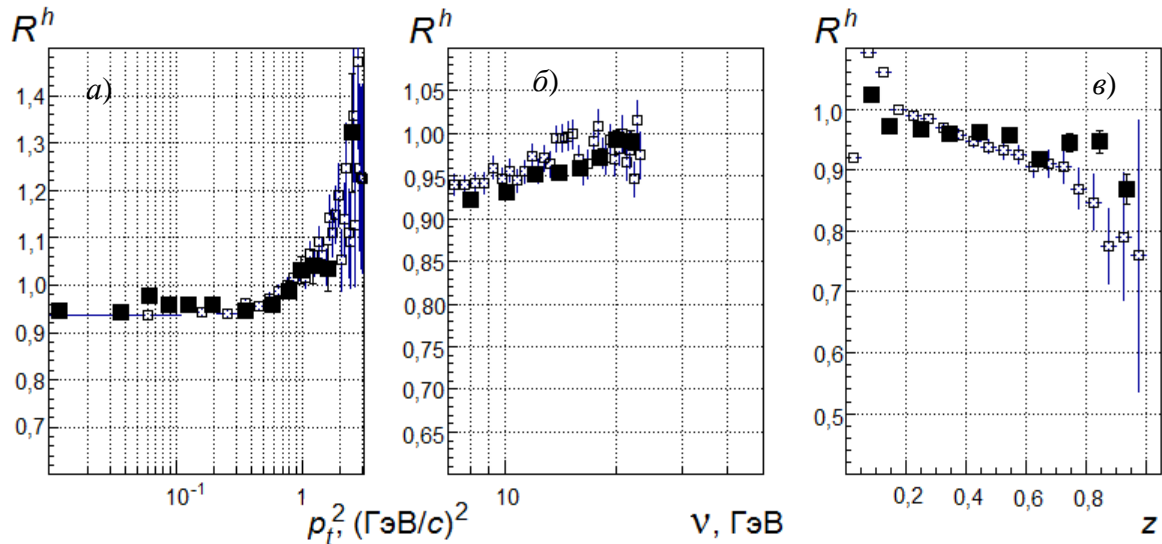


Рисунок 2. Отношение множественностей заряженных адронов для азотной и дейтонной мишеней, как функция квадрата поперечного импульса (а), энергии виртуального фотона ν (б) и доли энергии (в) виртуального фотона переданной адрону. Приведены данные эксперимента HERMES (черные маркеры) и результаты МК моделирования с помощью HARD-PING (светлые маркеры).

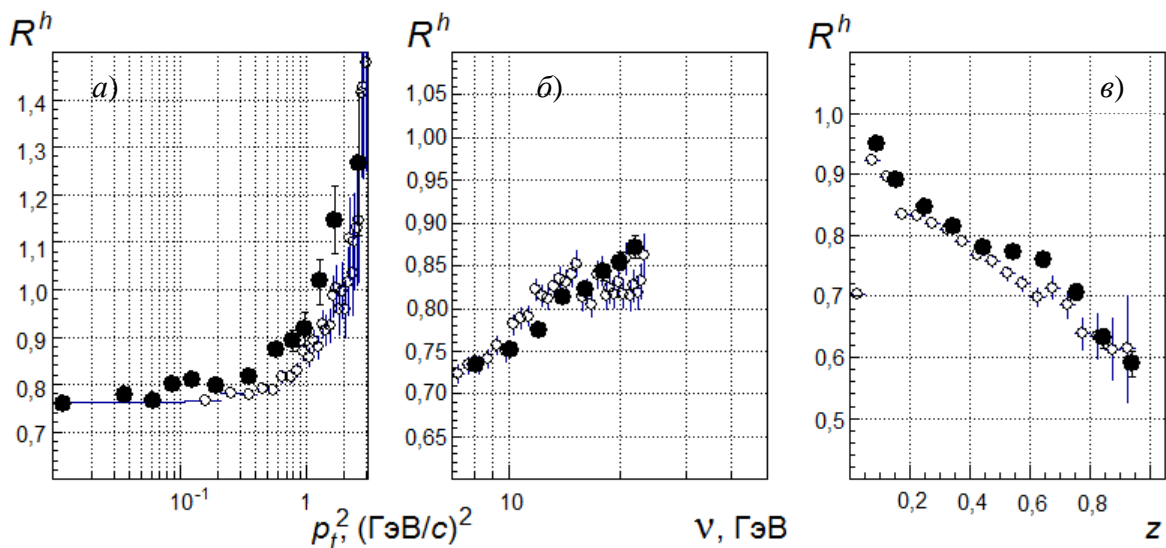


Рисунок 3. Отношение множественностей заряженных адронов для криптонной и дейтонной мишеней, как функция квадрата поперечного импульса (а), энергии виртуального фотона ν (б) и доли энергии (в) виртуального фотона переданной адрону. Приведены данные

эксперимента HERMES (черные маркеры) и результаты МК моделирования с помощью HARDPING (светлые маркеры).

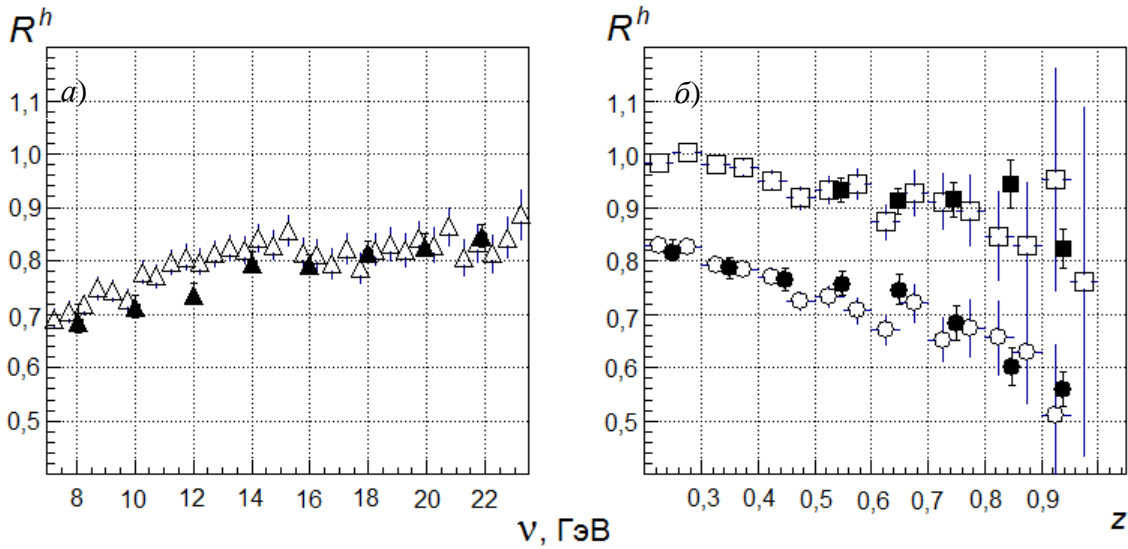


Рисунок 4. Отношение множественностей π^+ - мезонов для азотной и дейтонной (квадратные маркеры) и для криптонной и дейтонной (треугольные и круглые маркеры) мишеней, как функция энергии виртуального фотона ν (а) и доли энергии (б) виртуального фотона переданной адрону. Приведены данные эксперимента HERMES (черные маркеры) и результаты МК моделирования с помощью HARDPING (светлые маркеры).

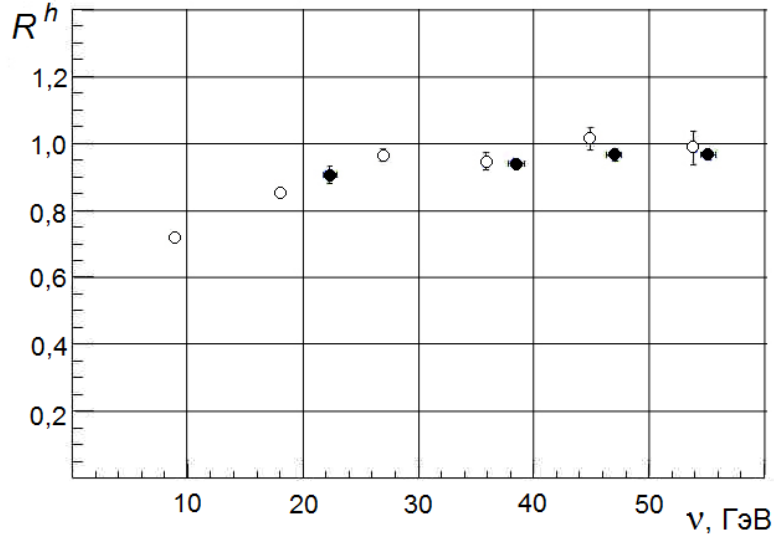


Рисунок 5. Отношение множественностей π^+ - мезонов для медной и дейтонной мишеней, как функция энергии виртуального фотона ν . Приведены данные эксперимента EMC (черные маркеры) и результаты МК моделирования с помощью HARDPING (светлые маркеры).

В четвертой главе описывается создание МК генератора для описания рождения адронов в адрон-ядерных взаимодействиях. Учтены эффекты начального и конечного состояния. Для упрощения анализа и определения параметров

модели сначала рассматриваются процессы Дрелла-Яна на ядрах - рождение лептонных пар в адрон-ядерных столкновениях, что позволяет изучать взаимодействия в начальном состоянии отдельно от взаимодействий в конечном состоянии. Для того чтобы описать экспериментальные данные были учтены следующие процессы: многократные мягкие перерассеяния до жесткого взаимодействия и энергетические потери до жесткого взаимодействия. Учет этих эффектов позволил описать экспериментальные данные по рождению лептонных пар в протон-ядерных соударениях эксперимента E866. Результаты приведены на рисунке 6 [4]. Из приведенных распределений видно согласие созданной модели с экспериментальными данными. Учет взаимодействий в начальном и конечном состояниях позволил перейти к описанию процессов рождения адронов в жестких адрон-ядерных столкновениях.

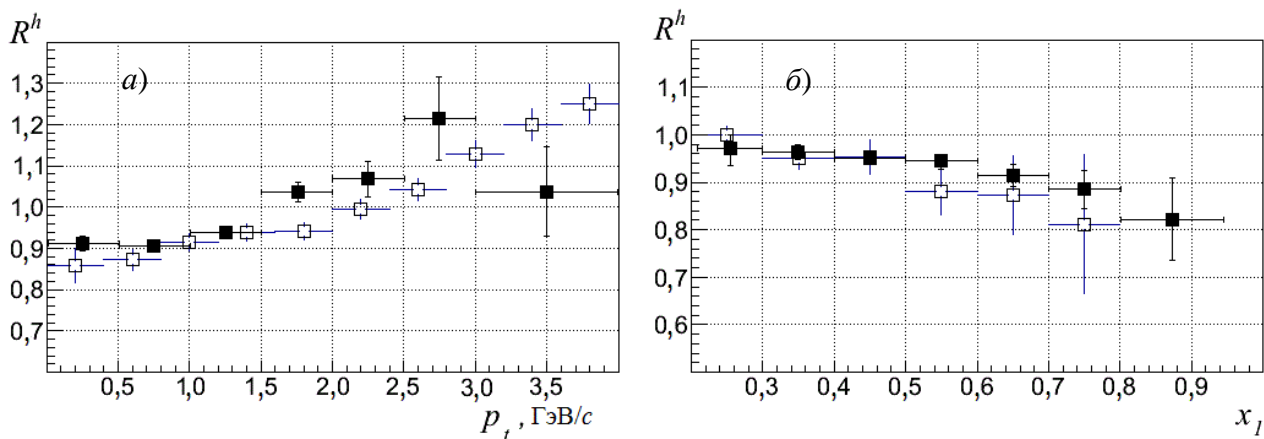


Рисунок 6. Отношения дифференциальных сечений рождения лептонных пар в pW - и pVe -столкновениях при энергии 800 ГэВ в зависимости от поперечного импульса p_t пары (а) и как функция доли x_1 4-е импульса налетающего протона, которую несет партон (б) измеренные коллаборацией E866 (светлые кружки), вычисленные с помощью генератора HARDPING (темные кружки).

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Основные результаты диссертационной работы:

1. Разработан Монте-Карло генератор HARDPING для моделирования лептон-ядерных взаимодействий с учетом длины формирования, мягких перерас-

сеяний и продольных энергетических потерь в ядре кварков и адронов, образовавшихся в жестком взаимодействии.

2. Разработан Монте-Карло генератор HARDPING для моделирования адрон-ядерных взаимодействий с учетом мягких перерассеяний и продольных энергетических потерь кварков в ядре до жесткого взаимодействия, изменения структурных функций внутриядерных нуклонов.

Выводы диссертационной работы:

1. Показано, что мягкие перерассеяния и энергетические потери адронов и составляющих их кварков в конечном состоянии играют важную роль в процессе глубоконеупругого рассеяния лептонов на ядрах. Учет этих эффектов позволяет описать экспериментальные отношения сечений рождения адронов на различных ядрах.

2. Показано, что необходимо учитывать длину формирования адронов и составляющих их кварков в конечном состоянии, для того чтобы описать экспериментальные данные по рождению адронов в лептон-ядерных взаимодействиях.

3. Показано, что мягкие перерассеяния и энергетические потери кварков налетающего адрона в начальном состоянии играют важную роль в процессе Дрелла-Яна на ядрах. Учет этих эффектов позволяет описать экспериментальные отношения инклюзивных сечений рождения лептонных пар на различных ядрах.

4. Определена величина удельных потерь энергии составляющих кварков в ядерной среде, которая составила 1,7 ГэВ/фм. Эта величина не зависит от начальной энергии налетающих частиц в рассмотренном диапазоне энергий.

Публикации автора по теме работы

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:

1. **Berdnikov, Ya.A.** MC generator HARDPING 2.0: hadron production in lepton-nuclei interactions at high energies [Текст] / Ya.A. Berdnikov, A.E. Ivanov, V.T. Kim, V.A. Murzin // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. – 2011. - Vol. 219. – P. 308–311.

2. **Бердников, Я.А.** Образование адронов в лептон-ядерных взаимодействиях при высоких энергиях [Текст] / Я.А. Бердников, А.Е. Иванов, В.Т. Ким, В.А. Мурзин // Научно-технические ведомости СПбГПУ – 2011. - Т. 134. – С. 185–190.

3. **Berdnikov, Ya.A.** Hadron production in lepton-nuclei interactions at high energies: Monte-Carlo generator HARDPING 2.0 [Текст] / Ya.A. Berdnikov, A.E. Ivanov, V.T. Kim, V.A. Murzin // Письма в ЖЭТФ – 2012. - Vol. 96. – P. 89–92.

4. **Бердников, Я.А.** Ядерные эффекты в адрон-ядерных взаимодействиях при высоких энергиях [Текст] / Я.А. Бердников, А.Е. Иванов, В.Т. Ким, В.А. Мурзин, Д.П. Суетин // Научно-технические ведомости СПбГПУ – 2012. - Т. 153. – С. 118–123.

Список литературы

5. **Kopeliovich, B.Z.** Nuclear hadronization: Within or without? [Текст] / B.Z. Kopeliovich, J. Nemchik, E. Predazzi, A. Hayashigaki // Nucl. Phys. – 2004. – Vol. A740. – P. 211–244.

6. **Kopeliovich, B.Z.** Hadronization in nuclear environment and electroproduction of leading hadrons [Текст] / B.Z. Kopeliovich, J. Nemchik, E. Predazzi // proceedings of the conference Confinement physics – 1995. – P. 391–395.

7. **Accardi, A** Hadron production in deep inelastic lepton–nucleus scattering [Текст] / A. Accardi, V. Muccifora, H.J. Pirner // Nucl. Phys. – 2003. – Vol. A720. – P. 131–157.

8. **Accardi, A.** Atomic mass dependence of hadron production in deep inelastic scattering on nuclei [Текст] / A. Accardi, D. Grunewald, V. Muccifora, H.J. Pirner // Nucl. Phys. – 2005. – Vol. A761. – P. 67–96.

9. **Levin, E.M.** Production of hadrons with large transverse momenta on nuclei in framework of QCD [Текст] / E.M. Levin, M.G. Ryskin // Yad. Fiz. - 1981. - Vol. 33. - P. 1673-1678.