

На правах рукописи

Рыжинский Михаил Михайлович

**ЗАВИСИМОСТЬ ПРОЦЕССОВ ЖЕСТКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
АДРОНОВ И ЛЕПТОНОВ С ЯДРАМИ ОТ МАССОВЫХ ЧИСЕЛ ЯДЕР**

Специальность 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2006

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

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

доктор физико-математических наук,
профессор

Бердников Ярослав Александрович

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник

Боресков Константин Георгиевич

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

Рябов Виктор Германович

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ:

ГНЦ Институт Физики Высоких Энергий, Протвино

Защита состоится “ _____ ” _____ 2006 года в _____ часов

на заседании диссертационного совета Д 212.229.05 при ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет” по адресу:

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 29, корпус 2, ауд. 265.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”.

Автореферат разослан “ _____ ” _____ 2006 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.229.05

доктор физико-математических наук

профессор

Титовец Ю.Ф.

Актуальность работы

Исследование механизма взаимодействия адронов и лептонов с ядрами является одной из важнейших областей физики высоких энергий. Изучая вторичные частицы, рождающиеся в адрон-ядерных (hA) и лептон-ядерных (lA) столкновениях, можно получить информацию об особенностях протекания таких взаимодействий. Извлечь такого рода информацию не просто, так как на характеристики вторичных частиц оказывает влияние множество факторов, имеющих место на промежуточных стадиях протекания ядерной реакции. Крайне сложно, например, извлечь информацию о роли и типе процессов (например, процессов перераспределения партонов в начальном состоянии, фрагментации кварков в адроны, пространственно-временной эволюции партонов в адроны и т.д.), понимание особенностей которых позволит дать ответ на насущные вопросы, связанные как с механизмом взаимодействия, так и с возможным образованием новых состояний вещества, таких как кварк-глюонная плазма. Успехи экспериментальных исследований породили большое количество теоретических работ, которые основаны на различных подходах (феноменологические модели, Монте-Карло (МК) моделирование, решеточные методы, теория возмущений квантовой хромодинамики (КХД) и др.) и демонстрируют большой интерес физиков к процессам взаимодействия частиц с ядрами.

Однако современное состояние развития этой области не вполне удовлетворительно, так как для проверки достоверности тех или иных теоретических предсказаний постоянно требуются новые эксперименты. Далеко не все теоретические модели, находят сегодня экспериментальное подтверждение.

Несмотря на то, что методы исследования высокоэнергетических взаимодействий адронов и лептонов с ядрами достаточно хорошо разработаны, по мере развития ускорительной техники и, в связи с этим, увеличения энергии столкновений, постоянно появляется необходимость поиска новых методов анализа экспериментальных результатов.

Вопросам изучения механизма жестких hA - и lA -взаимодействий и поиску новых методов анализа экспериментальных данных в области физики высоких энергий и посвящена данная работа.

Метод анализа экспериментальных данных

Анализ инклюзивных сечений рождения вторичных частиц в области фрагментации налетающей частицы обычно проводится в зависимости от переменной Фейнмана

$$x_F = \frac{p_L}{p_{L\max}}, \quad (1)$$

где p_L и p_{Lmax} соответственно продольный импульс вторичной частицы и максимально возможное значение этого импульса. Таким образом, величина x_F в передней полусфере может принимать значения в диапазоне от 0 до 1. Величина p_{Lmax} , вообще говоря, зависит от типа вторичной частицы и отличается от начального импульса p_0 . Например, в случае pp столкновений наиболее быстрые π^+ мезоны рождаются в реакции $pp \rightarrow \pi^+ D$, а наиболее быстрые антипротоны – в реакции $pp \rightarrow \bar{p}ppp$, т.е. значения p_{Lmax} определяются законами сохранения, а также поперечными импульсами вторичных частиц.

В случае столкновений с ядрами ситуация сильно усложняется. Формально значения p_{Lmax} определяются законами сохранения, однако при этом инклюзивные сечения при самых больших x_F будут соответствовать процессам когерентного рождения (когда ядро остается в основном состоянии), сечение которых настолько мало, что в эксперименте, возможно, не будет зарегистрировано ни одного события. События, дающие заметный вклад в полное неупругое сечение, происходят в результате значительного разрушения ядра мишени. Поэтому уменьшается энергия, которую можно затратить на рождение изучаемой частицы, т.е. уменьшается фактическая величина p_{Lmax} .

Энергия, затрачиваемая на разрушение ядра мишени, весьма значительна. Так, например, в исследованиях взаимодействий протонов с тяжелыми ядрами фотоэмульсии Ag + Wt она составила в среднем около 6 ГэВ, т.е. примерно 30% от начальной энергии налетающего протона, равной 21 ГэВ. К сожалению, экспериментальное распределение по энергии, идущей на развал ядра, неизвестно. Поэтому для анализа экспериментальных данных на ядрах будет использоваться значение

$$p_{Lmax} = p_0 - p_A, \quad (2)$$

где величина параметра p_A должна зависеть от атомного веса мишени, от типа процесса и (как минимум, при недостаточно высоких энергиях) от начальной энергии.

Цель работы

1. Разработка Монте-Карло генератора HARDPING (Hard Probe Interaction Generator) для моделирования адрон-ядерных взаимодействий с учетом мягких перерассеяний кварков и продольных потерь энергии кварков в начальном состоянии, а также экранирования структурных функций внутриядерных нуклонов. Исследование отношений инклюзивных сечений рождения лептонных пар l^+l^- в жестких hA -взаимодействиях (процесс Дрелла-Яна на ядрах) на различных ядрах как функции поперечного импульса и доли продольного импульса лептонной пары.
2. Исследование возможности объяснения подавления выхода J/ψ по сравнению с выходом лептонных пар в адрон-ядерных столкновениях только кинематическими причи-

нами, т.е. изменением начальной энергии налетающего адрона вследствие процессов в ядре мишени, влияющих на протекание взаимодействия адрона с ядром (ядерные эффекты).

3. Исследование возможности объяснения различной зависимости отношения дифференциальных множественностей вторичных адронов, рождающихся в глубокоэластичном рассеянии (DIS) заряженных лептонов на различных ядрах от доли энергии вторичных адронов.
4. Исследование физических причин различия в зависимостях дифференциальных сечений рождения вторичных частиц в жестких и мягких взаимодействиях от массовых чисел ядер (A -зависимости).

Научная новизна работы заключается в том, что впервые:

1. Предложен метод анализа A -зависимости рождения вторичных частиц в жестких адрон- и лептон-ядерных взаимодействиях в области фрагментации налетающей частицы.
2. Показано, что подавление выхода J/ψ по отношению к выходу лептонных пар может быть объяснено кинематическими причинами. Также показано, что A -зависимости вторичных адронов, рождающихся в процессах глубокоэластичного рассеяния лептонов на ядрах, могут быть объяснены теми же причинами.
3. Показано, что учет мягких перерассеяний партонов в начальном состоянии играет важную роль в процессе Дрелла-Яна на ядрах, а именно позволяет описать все имеющиеся экспериментальные данные для отношения дифференциальных сечений рождения лептонных пар на различных ядрах как функции поперечного импульса пары.

Научная и практическая ценность

Полученные результаты могут найти практическое применение при анализе экспериментальных данных, получаемых в настоящее время и планируемых в будущем на крупнейших ускорителях мира:

- CERN: эксперименты на SPS, эксперимент ALICE на LHC;
- FNAL: эксперименты на покоящихся мишенях;
- RHIC: эксперименты PHENIX, STAR, PHOBOS, BRAHMS;
- GSI: эксперимент CBM;

а также при поиске в вышеупомянутых экспериментах новых физических явлений.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Метод анализа экспериментальных данных по A -зависимости рождения вторичных частиц в жестких адрон- и лептон-ядерных взаимодействиях.
2. Значения удельных потерь энергии налетающей частицы на ядерные эффекты, проявляющиеся в процессах рождения J/ψ мезонов и лептонных пар в адрон-ядерных столкновениях и в процессах рождения вторичных адронов в глубоконеупругом рассеянии заряженных лептонов на ядрах (табл. 1).

Таблица 1. Значения удельных потерь энергии налетающей частицы на ядерные эффекты, проявляющиеся в процессах рождения J/ψ мезонов и лептонных пар в адрон-ядерных столкновениях и в процессах рождения вторичных адронов в глубоконеупругом рассеянии заряженных лептонов на ядрах.

Процесс	Начальная энергия, ГэВ	dE/dz , ГэВ/Фм
$p + W \rightarrow X + l^+l^-$	800	2.3–2.7
$p + W \rightarrow X + J/\psi$	800	4–5
$p + \text{Cu} \rightarrow X + J/\psi$	800	3–4
$\pi^- + W \rightarrow X + J/\psi$	125	2–3
$e^+ + \text{Kr} \rightarrow X + \pi$	12	0.5–0.6
$\mu^- + \text{Cu} \rightarrow X + h^\pm$	60	0.5–0.6

3. Учет энергетических потерь и многократных перерассеяний кварков в начальном состоянии позволяет описать отношение инклюзивных сечений процесса Дрелла-Яна для различных ядер как функции поперечного импульса и доли продольного импульса лептонной пары.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 6 печатных работ, список которых приведен в конце автореферата.

Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- LIV Совещание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра “Ядро-2004” (Белгород, 2004);
- Eighth International Workshop on “Nondestructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering” (St. Petersburg, 2004);

- LV National Conference on Nuclear Physics “Frontiers in the Physics of Nucleus” (St. Petersburg, 2005);
- Second International Workshop “Hadron Structure and QCD 2005” (St. Petersburg, 2005).

Содержание и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Объем диссертации составляет 93 страницы машинописного текста, в том числе 35 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 122 наименования.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность проведенного исследования, сформулированы цели диссертации, показаны научная новизна и практическая ценность работы. Представлены основные положения, выносимые на защиту. Дано краткое описание метода исследования.

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

Предложен новый метод оценки ядерных эффектов в процессах рождения J/ψ и лептонных пар в адрон-ядерных взаимодействиях, а также в процессах рождения вторичных адронов в глубоконеупругом рассеянии заряженных лептонов на ядрах.

Во второй главе описано создание Монте-Карло генератора HARDPING, являющегося расширением известного генератора HIJING на процесс рождения пар Дрелла-Яна в hA -соударениях, а также учитывающего такие ядерные эффекты начального состояния (до жесткого процесса, протекающего с большой передачей импульса) как многократные мягкие перерассеяния налетающего кварка в ядерной среде, энергетические потери налетающего кварка в продольном направлении, экранирования структурных функций внутриядерных нуклонов.

Эффект ядерного экранирования структурных функций нуклонов был учтен на основании параметризации структурных функций внутриядерных нуклонов, полученной теоретически с использованием уравнений эволюции Альтарелли-Паризи. Данный эффект учитывался на всех стадиях дальнейшего исследования этой главы.

В рамках аддитивной кварковой модели динамика адрон-ядерных реакций может быть представлена следующим образом: каждый составляющий кварк (валлон) налетающего

адрона испытывает ряд мягких рассеяний независимо от других кварков на кварках нуклонов ядра. После нескольких мягких рассеяний валлона принадлежащий ему точечный партон (кварк, анти-кварк, глюон) участвует в жестком взаимодействии с одним из партонов нуклона ядра мишени, в котором происходит рождение лептонной пары в процессе аннигиляции. В результате мягких рассеяний кварк налетающего адрона приобретает дополнительный поперечный импульс, что может сказаться на спектре по этому импульсу наблюдаемых лептонов. Таким образом, чтобы моделировать распределение партона в налетающем адроне, необходимо учитывать два распределения: валлона после n мягких перерассеяний $G_q^{n-1}(k_T)$

$$G_q^m(\vec{k}_T) = \frac{B^2}{2\pi \Gamma[1 + (3m+1)/2]} \left(\frac{Bk_T}{2} \right)^{(3m+1)/2} K_{(3m+1)/2}(Bk_T),$$

и партона внутри данного валлона $F_V(k_T)$

$$F_V(k_T) = \frac{B_H^2}{2\pi} e^{-Bk_T},$$

где $m = n - 1$, $K_m(y)$ – функция Макдональда порядка m , $\Gamma(\alpha)$ – гамма-функция Эйлера ($\alpha = 1 + (3m + 1)/2$), $B = 2/\langle k_V \rangle$, где $\langle k_V \rangle$ – средний поперечный импульс валлона в адроне, $B_H = 2/\langle k_q^{\text{hard}} \rangle$ ($\langle k_q^{\text{hard}} \rangle$ – средний поперечный импульс партона в валлоне). Результирующее распределение представляется в виде свертки

$$F_N(k_T) = G_q^{n-1} \otimes F_V = \int d^2 k_V d^2 k_q^{\text{hard}} G_q^{n-1}(k_V) F_V(k_q^{\text{hard}}) \delta^2(k_T - k_V - k_q^{\text{hard}}).$$

На рис. 1 приведены результаты моделирования отношений инклюзивных сечений рождения лептонных пар во взаимодействиях протонов с легким (Be) и тяжелым (W, Fe) ядрами при энергии 800 ГэВ в зависимости от поперечного импульса p_T пары при оптимальных значениях параметров модели:

$$\langle k_q^{\text{hard}} \rangle = 0.9\text{--}1.3 \text{ ГэВ},$$

$$\langle k_V \rangle = 0.2\text{--}0.4 \text{ ГэВ},$$

$$\sigma = 8\text{--}10 \text{ мбн} \text{ – сечение неупругого мягкого кварк-нуклонного взаимодействия.}$$

В случае, когда налетающей частицей является протон, то согласно аддитивной кварковой модели сечение σ равно приблизительно одной трети сечения протон-нуклонного взаимодействия, которое составляет примерно 30 мбн. Кроме того, как можно показать из соотношения неопределенности, среднее значение импульса валлона в протоне примерно в три раза меньше среднего импульса точечного партона в валентном кварке. Таким образом, полученные значения параметров не противоречат приведенным выше рассуждениям.

Еще один эффект, который был учтен в HARDPING, – это процесс энергетических потерь кварка в начальном состоянии. Адрон, распространяясь в ядре, в первом своем неуп-

ругом мягком взаимодействии распадается на партоны, один из которых, после прохождения некоторого расстояния L в ядре (вероятность чего $W_1(L)$), в жестком взаимодействии рождает лептонную пару.

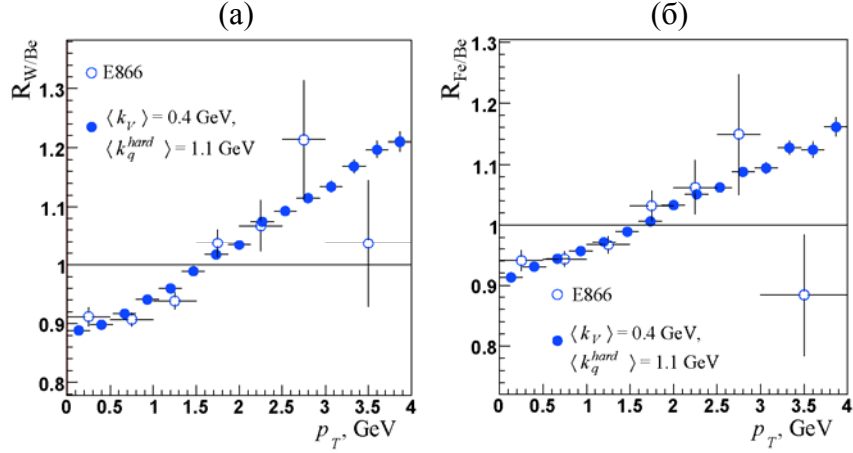


Рисунок 1. Отношения дифференциальных сечений рождения лептонных пар в pW - и pBe -столкновениях (а) и в pFe - и pBe -столкновениях (б) при энергии 800 ГэВ в зависимости от поперечного импульса p_T пары: измеренные Коллаборацией E866 (светлые кружки), вычисленные с помощью генератора HARDPING при указанных на рисунке оптимальных значениях параметров модели (темные кружки).

Однако существует конечная вероятность W_0 того, что адрон не испытает ни одного неупругого взаимодействия в ядре до жесткого процесса. В соответствии с этим распределение вероятности для величины L

$$W(L) = W_0\delta(L) + W_1(L).$$

Данная модель содержит два параметра: длина L пробега кварка в ядре и удельные потери энергии кварка dE/dz .

Результаты моделирования программой HARDPING при $dE/dz = 3$ ГэВ/Фм представлены на рис. 2, где приведены отношения дифференциальных сечений рождения лептонных пар в pW - и pBe -взаимодействиях при энергии 800 ГэВ в зависимости от доли x_1 продольного импульса лептонной пары:

$$x_1 = \frac{p_{l\bar{l}}}{p_0}.$$

Приведенные зависимости представлены для различных диапазонов инвариантных масс M лептонных пар. Значения параметра dE/dz , при которых наблюдается согласие с экспериментальными данными, лежат в пределах $dE/dz = 2.7\text{--}3.2$ ГэВ/Фм, что также согласуется с рядом теоретических оценок $dE/dz = (2.73 \pm 0.37)$ ГэВ/Фм.

В третьей главе, на основе предложенного в диссертации метода, выполнена оценка энергетических потерь налетающего адрона на процессы в ядре мишени (ядерные эффекты), приводящие к подавлению выхода J/ψ частиц и лептонных пар в hA -столкновениях по сравнению с адрон-нуклонными взаимодействиями.

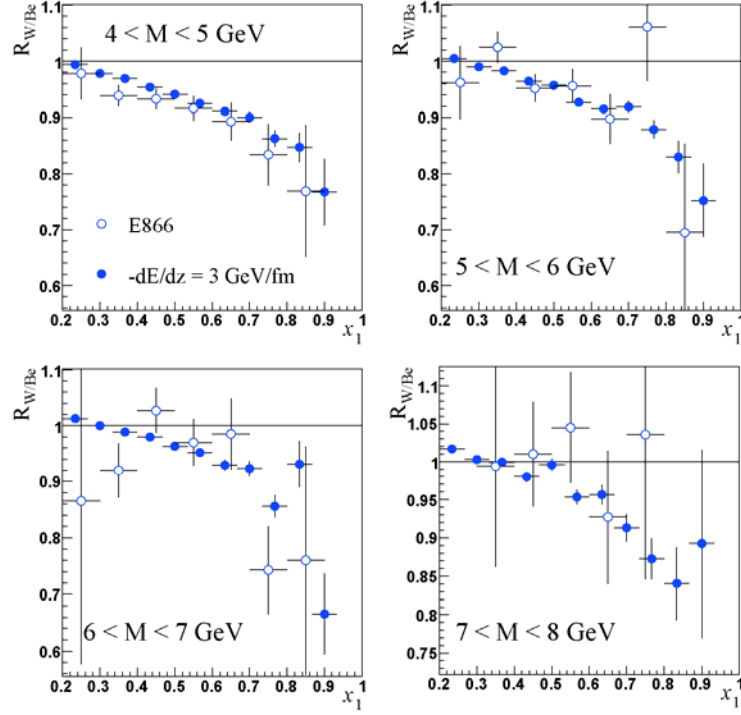


Рисунок 2. Отношения дифференциальных сечений рождения лептонных пар в pW - и pBe -столкновениях при энергии 800 ГэВ в зависимости от доли x_1 продольного импульса лептонной пары: измеренные Коллаборацией E866 (светлые кружки), вычисленные с помощью генератора HARDPING при $dE/dz = 3$ ГэВ/Фм (темные кружки). Приведенные зависимости представлены для различных диапазонов инвариантных масс M лептонных пар.

В данной главе анализировалось отношение R_{A_1/A_2} дифференциальных сечений рождения J/ψ мезонов (лептонных пар), образующихся в результате взаимодействия адронов с тяжелым (A_1) и легким ядрами (A_2):

$$R_{A_1/A_2}(x_0) = \frac{\frac{1}{A_1} \left(\frac{d\sigma}{dx_0} \right)_{hA_1 \rightarrow J/\psi(l^+l^-)}}{\frac{1}{A_2} \left(\frac{d\sigma}{dx_0} \right)_{hA_2 \rightarrow J/\psi(l^+l^-)}}, \quad (3)$$

где x_0 – доля продольного импульса адрона, которую унес J/ψ мезон (лептонная пара):

$$x_0 = \frac{p}{p_0}, \quad (4)$$

где p – импульс вторичной частицы, а p_0 – импульс налетающего адрона (обе величины в с.ц.и. адрон-нуклон). На величину x_0 влияют как взаимодействия в начальном, так и в конечном состояниях (до и после жесткого процесса соответственно). В случае процесса Дрелла-Яна взаимодействия с ядерной средой в конечном состоянии отсутствуют, так как лептоны не способны к сильному взаимодействию. Поэтому в процессе Дрелла-Яна следует учитывать лишь эффекты начального состояния. Взаимодействия в начальном и конечном состояниях приводят к уменьшению величины x_0 .

Очевидно, что потери энергии в начальном состоянии эквивалентны уменьшению начального импульса p_0 . Так как взаимодействия в конечном состоянии приводят к уменьше-

нию x_0 , то можно допустить, что это уменьшение может эффективно рассматриваться как дополнительное уменьшение p_0 . Таким образом, можно считать, что начальный импульс p_0 в результате ядерных эффектов уменьшился на какую-то величину $p_0 - p_A$, где p_A – это феноменологический параметр, учитывающий источники энергетических потерь в ядре, которые приводят к подавлению выхода вторичных частиц по сравнению с hN -взаимодействиями.

В данной главе рассматриваются A -зависимости рождения J/ψ частиц и лептонных пар в терминах переменной x_F :

$$x_F = \frac{p}{p_0 - p_A}. \quad (5)$$

Анализ проводился следующим образом. Пусть имеется два x_0 -спектра J/ψ частиц (лептонных пар) на легком и тяжелом ядрах. Тогда можно модифицировать спектр J/ψ на тяжелом ядре согласно выражению (5), варьируя параметр p_A . Предполагая, что ядерные эффекты малы для очень легких ядер, можно найти долю энергии/импульса налетающего адрона, затраченную на ядерные эффекты. Последнее можно сделать, вычислив отношение модифицированного спектра J/ψ на тяжелом ядре к спектру J/ψ на легком ядре. Если это отношение близко к единице, то соответствующее значение параметра p_A будет содержать абсолютное значение энергии/импульса, потерянной на ядерные эффекты. Такой подход, кроме всего прочего, позволяет проследить зависимость энергетических потерь от начальной энергии.

В данной главе были проанализированы экспериментальные данные по A -зависимости рождения J/ψ частиц в pA - и в πA -реакциях на покоящейся мишени. В результате анализа получены следующие значения удельных потерь энергии налетающего адрона на процессы в ядре мишени, приводящие к подавлению выхода J/ψ по сравнению с адрон-нуклонными реакциями:

- $dE/dz = 4\text{--}5$ ГэВ/Фм – рождение J/ψ мезонов в pW -взаимодействиях при энергии протонов 800 ГэВ,
- $dE/dz = 3\text{--}4$ ГэВ/Фм – рождение J/ψ мезонов в pCu -взаимодействиях при энергии протонов 800 ГэВ,
- $dE/dz = 2\text{--}3$ ГэВ/Фм – рождение J/ψ мезонов в π^-W -взаимодействиях при энергии протонов 125 ГэВ,

Уменьшение величины dE/dz для случая ядра меди по сравнению с вольфрамом может быть связано с зависимостью энергетических потерь, более сильной, чем $A^{1/3}$. Последнее не исключается, т.к. множественность вторичных протонов с энергиями менее 1 ГэВ, образующихся в адрон-ядерных взаимодействиях в области фрагментации ядра мишени, обладают

более сильной A -зависимостью, чем $A^{1/3}$. Энергии же этих протонов определяются потерями энергии налетающего адрона на ядерные эффекты в соответствующих процессах.

Аналогичный анализ был проведен для случая рождения пар Дрелла-Яна в адрон-ядерных взаимодействиях. Все современные данные по A -зависимости рождения лептонных пар представлены в виде отношений x_0 -спектров $\Gamma\Gamma$ пар на тяжелом и легком ядрах. Для проведения же предлагаемого анализа требуется знать сами спектры, или хотя бы один из них и отношение (3). Так как применить вышеописанный алгоритм непосредственно к экспериментальным данным по A -зависимости рождения лептонных пар невозможно, то при анализе процесса рождения Дрелл-Яновских пар в адрон-ядерных реакциях был использован МК-генератор HARDPING. Этот генератор хорошо описывает все экспериментальные данные по A -зависимости процесса Дрелла-Яна в адрон-ядерных взаимодействиях. С помощью HARDPING были смоделированы спектры лептонных пар в pW - и pBe -реакциях на покоящейся мишени при энергии протонов 800 ГэВ, к которым и был применен вышеописанный анализ. В результате было получено значение удельных потерь $dE/dz = 2.5\text{--}3.0$ ГэВ/Фм.

Результаты проведенного анализа процессов рождения J/ψ мезонов и лептонных пар в адрон-ядерных взаимодействиях хорошо согласуются с современными теоретическими предсказаниями. Таким образом, наблюдаемое подавление J/ψ мезонов по сравнению с парами Дрелла-Яна можно объяснить чисто кинематическими причинами (различными значениями p_A в выражении (5)).

В четвертой главе предложенный в диссертации метод применен для случая процессов глубоконеупругого рассеяния заряженных лептонов на ядрах.

В процессе глубоконеупругого рассеяния ядру передается точно определяемая часть энергии ($\nu = E - E'$), в отличие от случая адрон-ядерной реакции. Поэтому, чтобы провести аналогию между процессами рождения вторичных частиц в адрон-ядерных и лептон-ядерных (DIS) столкновениях, в последнем случае в качестве начальной энергии можно рассматривать энергию, переданную лептоном ядру (т.е. ν). Соответствующие экспериментальные данные приводятся в терминах переменной $z_h = E_h/\nu$ (доля начальной энергии вторичного адрона), A -зависимости рождения вторичных адронов в глубоконеупругом рассеянии анализируются в терминах переменной

$$z_A = E_h/(\nu - E_A), \quad (6)$$

где E_h – это энергия рожденного адрона, а E_A – феноменологический параметр, учитывающий, сколько энергии, переданной лептоном ядру, затрачено на ядерные эффекты, которые приводят к подавлению выхода вторичных адронов в глубоконеупругом рассеянии на ядрах по сравнению с DIS на протонах.

В данной главе были проанализированы экспериментальные отношения выходов адронов h , рожденных в результате глубоконеупругого рассеяния лептонов l на ядре A , к их выходу на ядре дейтрона D :

$$R_{A/D} = \frac{\frac{1}{A} \left(\frac{d\sigma}{dz} \right)_{lA \rightarrow h}}{\frac{1}{2} \left(\frac{d\sigma}{dz} \right)_{lD \rightarrow h}}. \quad (7)$$

Анализ проводился следующим образом. Пусть имеется два z_h -спектра DIS для ядра дейтрона и какого-либо тяжелого ядра. Тогда последний можно модифицировать согласно формуле (6), изменяя параметр E_A . Предполагая, что ядерные эффекты несущественны в ядре дейтрона, можно найти потерю начальной энергии в тяжелом ядре (для процессов глубоконеупругого рассеяния лептонов на ядрах), вычислив отношение модифицированного z_h -спектра вторичных частиц, рожденных в глубоконеупругом рассеянии лептонов на тяжелом ядре, к z_h -спектру частиц, образующихся в DIS на ядре дейтрона. Когда это отношение будет близко к единице, соответствующее значение параметра E_A будет содержать абсолютную потерю начальной энергии на соответствующие ядерные эффекты.

Представленным методом были проанализированы экспериментальные данные Коллабораций HERMES (рождение пионов в e^+D - и e^+Kr -столкновениях при энергии позитронов 27.5 ГэВ, $\nu = 7$ –12 ГэВ) и EMC (рождение заряженных адронов в μD - и μCu -столкновениях при энергии мюонов 100–280 ГэВ, $\nu = 60$ ГэВ). Для данных HERMES для всех сортов пионов, рождающихся на ядре криптона, было получено значение удельных потерь энергии $dE/dz = 0.5$ – 0.6 ГэВ/Фм. Для заряженных адронов, рождающихся на ядре меди (EMC), получен результат $dE/dz = 0.5$ – 0.6 ГэВ/Фм. Из большой разницы экспериментальных значений энергий ($\nu = 7$ –12 и 60 ГэВ) и, учитывая зависимость $R_{A/D}(\nu)$ (измеренную в HERMES), можно сделать вывод, что энергетические потери практически не зависят от начальной энергии: $E_A(\nu) \approx const$. Результаты проведенного анализа находятся в достаточно хорошем согласии с современными теоретическими предсказаниями.

Кроме процессов DIS, в данной главе предпринята попытка проанализировать предлагаемым в диссертации методом процессы образования адронов в мягких ($p_T \leq \Lambda_{\text{КХД}} \approx 200$ МэВ, где $\Lambda_{\text{КХД}}$ – характерный масштаб энергий, на котором кварки связываются в адроны) hA -взаимодействиях. На рис. 3 представлены результаты проведенного анализа. Из рисунка можно видеть, что предлагаемый метод не применим для анализа A -зависимости мягких адрон-ядерных взаимодействий.

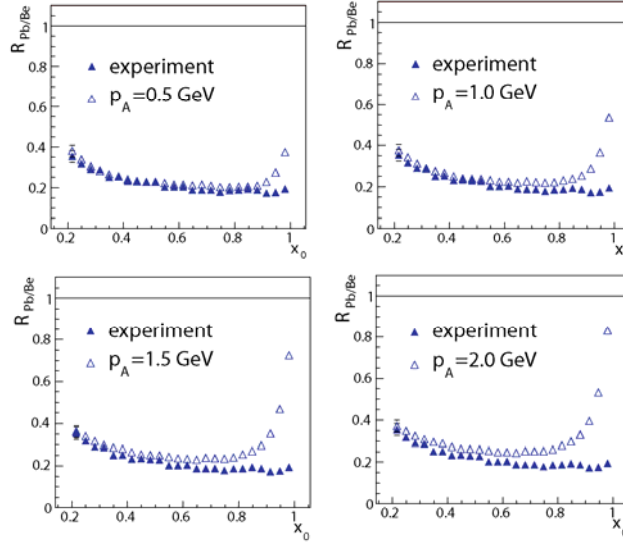
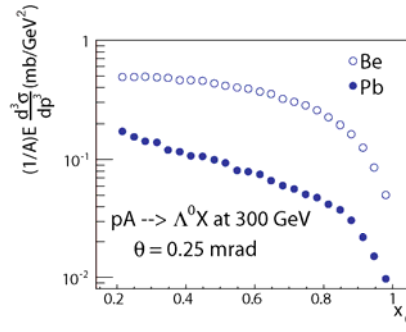


Рисунок 3. x_0 -спектры Λ гиперонов в мягких ($\theta = 0.25$ мрад) $p\text{Pb}$ - (светлые кружки) и $p\text{Pb}$ -взаимодействиях (темные кружки) при энергии 300 ГэВ (верхняя часть). Нижняя часть: отношения множественностей Λ гиперонов, рождающихся в мягких $p\text{Pb}$ - и $p\text{Be}$ -взаимодействиях при энергии 300 ГэВ в зависимости от x_0 : экспериментальное (темные треугольники) и вычисленные для различных p_A (светлые треугольники).

Невозможно подобрать такое разумное значение параметра p_A , при котором модифицированное отношение было бы равно единице. Одним из возможных объяснений такого поведения может быть то, что при больших значениях x_0 в мягких процессах с наибольшей вероятностью взаимодействие происходит на периферии ядра, где энергетические потери ничтожны. Наглядно это можно проследить в следующем рассуждении.

Обычно A -зависимость сечение адрон-ядерных процессов параметризуется как

$$x_0 \frac{d\sigma}{dx_0} \propto A^{\alpha(x_0)}.$$

Для мягких процессов экспериментальное значение α для $x_0 \geq 0.2-0.3$ (в данной области значение параметра α практически постоянно) составляет примерно $1/3$, в то время как для жестких процессов $\alpha \approx 1$. Это соответствует картине, когда вторичные частицы рождаются в результате однократного взаимодействия налетающего адрона с ядром. Соответствующее сечение для n -кратного неупругого взаимодействия имеет вид:

$$\sigma_{prod}^{(n)} = \frac{1}{n!} \int d^2b [\sigma_{in} T(\vec{b})]^n e^{-\sigma_{in} T(\vec{b})},$$

где $T(\vec{b}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(\vec{b}, z) dz$ – профиль-функция ядра ($\rho(\vec{b}, z)$ – концентрация нуклонов в ядре, \vec{b} – прицельный параметр), σ_{in} – сечение взаимодействия налетающей частицы с нуклоном. Для налетающего адрона величина $\sigma_{in} T(\vec{b})$ будет мала только в случае больших значений прицельных параметров, что неизбежно приводит к $\alpha \sim 1/3$ для больших значений x_0 , при которых многократные взаимодействия не могут давать заметного вклада. Таким образом, в случае жестких процессов все нуклоны ядра вносят примерно одинаковый вклад в сечение рождения вторичных частиц, в то время как в мягких процессах лишь малая доля нуклонов (расположенных преимущественно на периферии ядра) участвует во взаимодействии с ядром.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертации.

1. Предложен новый метод анализа A -зависимости рождения вторичных частиц в жестких адрон- и лептон-ядерных взаимодействиях в области фрагментации налетающей частицы.
2. Показано, что подавление выхода J/ψ по сравнению с выходом лептонных пар в адрон-ядерных взаимодействиях можно объяснить чисто кинематическими причинами, т.е. изменением начальной энергии налетающего адрона. Также показано, что A -зависимости частиц в процессах глубоконеупругого рассеяния лептонов на ядрах могут быть объяснены теми же причинами.
3. Разработан Монте-Карло генератор HARDPING (Hard Probe Interaction Generator) для моделирования адрон-ядерных взаимодействий с учетом мягких перерассеяний и продольных энергетических потерь кварков в ядре в начальном состоянии, изменения структурных функций внутриядерных нуклонов.
4. Показано, что эффекты мягких перерассеяний и энергетических потерь 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.
5. Получены значения удельных потерь начальной энергии на ядерные эффекты, проявляющиеся в жестких адрон- и лептон-ядерных взаимодействиях (табл. 1).

Публикации

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:

1. Бердников Я.А., Завацкий М.Е., Ким В.Т., Космач В.Ф., Рыжинский М.М., Самсонов В.М. Ядерные эффекты при образовании лептонных пар в адрон-ядерных соударениях // Ядерная физика. –2006. –Т. 69. –№3, –С. 467–473.

2. Berdnikov Ya.A., Kim V.T., Kosmach V.F., Ryzhinskiy M.M., Samsonov V.M., Zavatsky M.E. Initial-state nuclear effects in proton-nucleus collisions // Eur. Phys. J. A. –2005. – V. 26. –P. 179–184 (e-Print Archive: hep-ph/0510260).
3. Berdnikov Ya.A., Ryzhinskiy M.M., Shabelski Yu.M., J/ψ and Drell-Yan pair production on nuclear targets // Phys. of Atom. Nucl. –2006. –V. 69. –№8, –P. 1330–1337 (e-Print Archive: hep-ph/0510152).
4. Berdnikov Ya.A., Ryzhinskiy M.M., Shabelski Yu.M., Nuclear effects in leptonproduction of secondaries // e-Print Archive: hep-ph/0602235. –2006. –P. 1–15.
5. Бердников Я.А., Рыжинский М.М., Шабельский Ю.М. Рождение J/ψ частиц в адрон-ядерных реакциях // *принято к печати в* Научно-технические ведомости СПбГТУ. – 2006. –№3(45).
6. Berdnikov Ya.A., Kim V.T., Kosmach V.F., Ryzhinskiy M.M., Samsonov V.M., Zavatsky M.E. Initial state nuclear effects in DY pairs production in proton-nucleus collisions // Proceedings of Eighth International Workshop on “Nondestructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering”, 7–13 June 2004, St. Petersburg, Russia, –P.18–21.