

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. Ломоносова

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ имени Д. В. Скобельцына

На правах рукописи

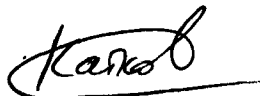
Катков Игорь Игоревич

ИЗМЕРЕНИЕ НЕУПРУГОГО РОЖДЕНИЯ
 J/ψ -МЕЗОНОВ В ПРОЦЕССАХ
ГЛУБОКОНЕУПРУГОГО РАССЕЯНИЯ
НА ЭЛЕКТРОН-ПРОТОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ HERA
В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ZEUS

Специальность 01.04.23 — физика высоких энергий

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2006 г.



Работа выполнена в Научно-исследовательском институте ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

Научные руководители:

Ермолов Павел Фёдорович

доктор физико-математических наук, профессор

НИИЯФ МГУ

Гладилин Леонид Константинович

доктор физико-математических наук

НИИЯФ МГУ

Официальные оппоненты:

Лиходед Анатолий Константинович

доктор физико-математических наук, профессор

ГНЦ Институт физики высоких энергий, г. Протвино

Баранов Сергей Павлович

доктор физико-математических наук

Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, г. Москва

Ведущая организация:

ГНЦ Институт теоретической и экспериментальной

физики имени А. И. Алиханова, г. Москва

Защита диссертации состоится 18 мая 2006 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета К501.001.03 при МГУ им. М. В. Ломоносова по адресу: 119992, г. Москва, Ленинские горы, НИИЯФ МГУ, 19-й корпус, аудитория 2-15.


С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ

Автореферат разослан 10 апреля 2006 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета К501.001.03 при МГУ

кандидат физико-математических наук

 А. К. Мангадзе

Актуальность темы исследования

Квантовая хромодинамика (КХД) является неотъемлемой частью Стандартной Модели элементарных частиц и их взаимодействий. Давая верное качественное описание эксперимента, КХД не обладает единым методом расчёта, применимым при любых характерных энергетических масштабах исследуемых процессов.

В процессах неупругого рождения чармония $e p \rightarrow e' J/\psi X$ проявляется тесная взаимосвязь пертурбативных и непертурбативных аспектов КХД. Образование пары очарованных кварков $c\bar{c}$ может быть рассчитано по теории возмущений в рамках КХД и описывается хорошо известным процессом фотон-глюонного слияния $\gamma^* g \rightarrow c\bar{c}$. При этом следует отметить чувствительность к распределению глюонов в протоне. Однако картина усложняется непертурбативными эффектами, связанными как с начальными распределениями глюонов в протоне, так и с формированием связанного состояния пары $c\bar{c}$, т.е. наблюдаемого состояния чармония.

Данные первых измерений сечений рождения J/ψ -мезонов, проведённые в CERN и Fermilab, находились в качественном согласии с предсказаниями модели цветowych синглетов (CSM) в лидирующем (LO) порядке теории возмущений. В модели цветowych синглетов $c\bar{c}$ -пара образует бесцветное (синглетное по цвету) состояние с квантовыми числами чармония при испускании жёсткого глюона, а переход, соответствующий формированию связанного состояния пары тяжёлых кварков, можно описать единственным параметром модели — значением нерелятивистской волновой функции чармония в нуле. Полученные позже в Fermilab данные по рождению J/ψ -мезонов с большими поперечными импульсами оказались более чем на порядок выше результатов расчётов в модели CSM (в рамках коллинеарного подхода). Учёт октетных вкладов в рамках так называемой нерелятивистской КХД (NRQCD) позволил получить согласие с этими экспериментальными данными. В рамках нерелятивистской КХД переходы из состояний, различающихся цветовой мультиплетностью и угловым мо-

мештом, параметризуются набором универсальных непертурбативных матричных элементов, которые подчиняются иерархии разложения по относительным скоростям кварков в связанном состоянии и определяются путём подгонки теоретических расчетов к экспериментальным данным. С учетом октетных вкладов также воспроизводится распределение по поперечному импульсу J/ψ -мезонов, полученное в $\gamma\gamma$ -взаимодействиях на LEP2. Однако поляризационные свойства J/ψ -мезонов, измеренные в адронных взаимодействиях на установке CDF, не соответствуют предсказаниям, полученным в нерелятивистской КХД. Сечения рождения и спектры импульсов J/ψ -мезонов, измеренные на установках BaBar и Belle в процессах e^+e^- -аннигиляции, не могут быть объяснены ни в CSM, ни в стандартном подходе NRQCD и требуют “комбинированного” учета как пертурбативных, так и непертурбативных поправок, связанных с описанием процесса обесдвечивания $c\bar{c}$ -пары при переходе в конечный мезон путём испускания жёсткого или мягких глюонов. Как CSM, так и NRQCD не описывают данные по двойному рождению чармония, полученные экспериментом Belle.

Теоретические результаты, полученные в модели цветных синглетов в коллинарном подходе с учётом высших поправок (NLO) теории возмущений, описывают фоторождение J/ψ -мезонов при энергиях коллайдера HERA. Сравнение предсказаний с данными указывает на то, что учёт высших поправок важен для хорошего описания спектров поперечных импульсов. Экспериментальные данные не противоречат и предсказаниям, полученным в рамках NRQCD в пределах больших неопределённостей, связанных, в основном, с величинами непертурбативных матричных элементов.

Данные по электророждению J/ψ -мезонов, полученные экспериментом H1, работающем на коллайдере HERA, сравнивались с теоретическим расчётом в лидирующем порядке теории возмущений в рамках нерелятивистской КХД с учетом и без учета октетных вкладов. Без учёта октетных вкладов результаты расчётов лежат ниже экспериментальных данных при больших поперечных импульсах. Однако при малых поперечных импульсах учет этих вкладов приводит к переоценке экспериментальных данных

почти в 2 раза. Форма спектра по переменной z также не описывается в случае учёта октетных вкладов.

В полужёстком, или k_T -факторизационном, подходе, в котором, в отличие от коллинеарного подхода, на уровне партонной динамики (эволюция BFKL, CCFM) учитывается ненулевая виртуальность (поперечный импульс) начального глюона, ожидается, что вклады октетных состояний значительно меньше или в них совсем нет необходимости по сравнению с расчетами в коллинеарном приближении. Полужёсткий подход успешно применялся для описания целого ряда процессов, в частности, было показано, что в рамках данного подхода могут быть описаны данные по неупругому фоторождению J/ψ -мезонов, опубликованные экспериментами ZEUS и H1. Однако теоретические результаты содержат значительные неопределенности, связанные с поведением (нелинтегрированных) глюонных распределений, зависимостью константы связи от энергетического масштаба, поправками высших порядков теории возмущений и непертурбативными эффектами. Таким образом применимость нерелятивистской КХД к процессам инклюзивного рождения чармония и существование октетных вкладов требует дальнейшего теоретического и экспериментального исследования.

Цель диссертационной работы

Целью данной диссертационной работы является экспериментальное исследование процессов неупругого рождения J/ψ -мезонов в процессах глубоко-неупругого рассеяния (ГНР). Анализируемые в работе данные были получены на установке ZEUS, работающей на электрон-протонном коллайдере HERA. Измерения сечений рождения J/ψ -мезонов проводятся в кинематической области $2 < Q^2 < 80 \text{ ГэВ}^2$, $50 < W < 250 \text{ ГэВ}$, $0.2 < z < 0.9$ и $-1.6 < Y_{\text{д.с.}} < 1.3$, где Q^2 — виртуальность обменного фотона, W — энергия в системе центра масс фотона и протона, z — доля энергии фотона, переданная J/ψ -мезону, в системе покоя протона (“неупругость”), а $Y_{\text{д.с.}}$ — быстрота J/ψ -мезона в лабораторной системе. Тем самым кинематическая область расширена по сравнению с той, которая использовалась экспери-

ментом H1, также работающем на коллайдере HERA. Помимо расширения кинематической области одной из задач также являлось расширение спектра измеримых переменных, чувствительных к различным механизмам рождения J/ψ -мезонов.

Важной задачей являлось включение в анализ данных полупроводникового адрон-электронного сепаратора установки ZEUS, позволяющего улучшить реконструкцию кинематики событий.

С целью установления возможности описания данных в рамках разных подходов к партонной динамике и процессу формирования связанного состояния пары тяжёлых кварков проводится сравнение измеренных сечений с теоретическими предсказаниями.

Научная новизна

Прежде всего следует отметить уникальность результатов, полученных на единственном в мире электрон-протонном коллайдере HERA.

Измерения неупругого рождения J/ψ -мезонов в процессах ГНР в эксперименте ZEUS ранее не проводились. Характеристики детектора ZEUS позволили расширить кинематическую область измерения неупругого рождения J/ψ -мезонов в ГНР по сравнению с той, которая использовалась экспериментом H1, параллельно работающем на коллайдере HERA.

Впервые для процессов $e p \rightarrow e' J/\psi X$ измерены параметры адронной системы X , что позволило провести более детальное сравнение с теоретическими предсказаниями. При сравнении данных с теоретическими вычислениями были оценены и учитывались вклады от процессов рождения $\psi(2S)$ - и B -мезонов с последующим распадом в J/ψ -мезон.

Практическая ценность

Результаты проведённого сравнения с теоретическими вычислениями стимулируют развитие и уточнение теоретических представлений о механизмах рождения J/ψ -мезонов.

Накопленный опыт и полученные результаты, включая опыт работы с

полупроводниковым адрон-электронным сепаратором, могут быть использованы как в дальнейших исследованиях на установке ZEUS, так и при планировании исследований на других экспериментальных установках.

Достоверность работы

Дополнительное измерение в кинематической области, которая использовалась экспериментом H1, также работающем на коллайдере HERA, позволило подтвердить результаты, полученные этим экспериментом. Согласие результатов двух экспериментов свидетельствует о их достоверности. Достоверность обеспечивается также процедурой второго независимого анализа, принятой в эксперименте ZEUS.

Личный вклад

Личное участие автора состоит в проведении анализа данных установки ZEUS, вычислении сечений неупругого рождения J/ψ -мезонов в процессах ГНР, проведении сравнения с теоретическими предсказаниями, усовершенствовании процедуры мониторинга полупроводникового адрон-электронного сепаратора.

Научные результаты, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие основные результаты: измерение неупругого рождения J/ψ -мезонов в процессах глубоконеупругого рассеяния в эксперименте ZEUS с использованием полупроводникового адрон-электронного сепаратора, для которого была усовершенствована процедура мониторинга данных; сравнение измеренных сечений с теоретическими предсказаниями в коллинеарном и полужёстком подходах, продемонстрировавшее отсутствие необходимости учёта октетных вкладов; сравнение с результатами эксперимента H1, параллельно работающего на коллайдере HERA.

Апробация работы и публикации

Результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на сессии секции ядерной физики отделения физических наук Российской Академии Наук (Москва, ИТЭФ, декабрь 2005 г.), семинаре лаборатории высоких энергий ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ (Москва, май 2005 г.), многократно на рабочих совещаниях эксперимента ZEUS в исследовательском центре DESY (Гамбург, Германия), а также на следующих конференциях:

- 12th International Conference on Quantum Chromodynamics QCD 2005 (Montpellier, France, July 2005).
- 11th International Workshop on Deep Inelastic Scattering DIS 2003, (Санкт-Петербург, апрель 2003 г.).

Основные результаты работы опубликованы в трудах конференций "CALOR 2002" [1] и "DIS 2003" [2], в журнале "The European Physical Journal C" [3], в препринтах НИИЯФ МГУ [4, 5].

Структура и объём диссертации

Диссертационная работа изложена на 110 страницах печатного текста, состоит из введения, четырёх глав, заключения и приложения, в котором протабулированы величины измеренных сечений. Работа содержит 43 иллюстрации, 5 таблиц и список литературы, включающий 86 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Во введении по результатам предыдущих измерений неупругого рождения J/ψ -мезонов и их сравнения с теоретическими предсказаниями демонстрируется актуальность темы диссертации. Отмечается личный вклад автора и новизна работы. Описывается структура диссертации.

Феноменология процессов рождения чармония

В первой главе кратко описывается семейство мезонов, состоящих из пары очарованных кварков, к которому относится J/ψ -мезон; определяются используемые кинематические переменные; излагаются основные сведения о разных подходах к описанию неупругого рождения J/ψ -мезонов как на уровне партонной динамики (коллинеарный и полужёсткий подходы), так и при описании формирования связанного состояния пары тяжёлых кварков (модель цветowych синглетов и факторизационный подход нерелятивистской КХД). При описании расчётов в полужёстком подходе даются принципы построения неинтегрированных глюонных распределений на примере параметризаций JB, KMS и KMR.

Эксперимент ZEUS на коллайдере HERA

Вторая глава начинается с описания электрон-протонного коллайдера HERA. Система предускорителей и накопительных колец коллайдера обеспечивает соударения пучка электронов или позитронов ¹⁾ с энергией 27.5 ГэВ с пучком протонов, энергия которого в процессе эксплуатации была увеличена с 820 до 920 ГэВ. Таким образом энергия в с.ц.м. коллайдерных экспериментов составляет 300 или 318 ГэВ.

Далее дано описание многофункционального детектора ZEUS. Приводятся основные характеристики тех отдельных компонент установки ZEUS, которые использовались для измерений, представленных в данной диссертации: центрального трекового детектора; компенсационного ураново-сцинтилляционного калориметра; мюонных камер; стрипового сцинтилляционного детектора, предназначенного для улучшения реконструкции рассеянных электронов при малых углах рассеяния; фотонного калориметра, предназначенного для измерения светимости; системы сбора и обработки данных, включая триггерную систему установки. Описание полупроводникового адрон-электронного сепаратора, использовавшегося в анализе данных для улучшения реконструкции рассеянных электронов и, тем самым,

¹⁾Ниже при упоминании о электронах подразумеваются также позитроны.

кинематики в целом, вынесено в отдельную главу.

Адрон-электронный сепаратор

В третьей главе даётся описание принципа работы, устройства и рабочих характеристик полупроводникового адрон-электронного сепаратора. Для разделения сигналов от электронов или фотонов и сигналов от адронов в электромагнитных секциях передней и задней частей калориметра установки ZEUS на глубине 3–5 радиационных длин (1.4 см) установлены два независимых массива кремниевых диодов приблизительно по 10 тыс. диодов в каждом.

Сепаратор установлен в районе максимума электромагнитного каскада, где адрон дает сигнал сходный с сигналом мюона, т.е. минимально ионизирующей частицы (МИЧ). Помимо возможности разделения каскадов, сепаратор обладает значительно лучшей сегментацией по сравнению с калориметром, тем самым обеспечивая лучшее разрешение при восстановлении координат.

Инфраструктура калориметра жёстко ограничивает объём доступный для размещения сепаратора. Ограниченный доступный объём, требование минимизации влияния на измерение энергии в калориметре и работа в магнитном поле обусловили использование полупроводникового детектора, характеризующегося большим уровнем сигнала в малом объёме детектора и нечувствительностью к магнитному полю.

Основу сепаратора составляют детектирующие карты, представляющие собой пару диодов и двухканальный зарядочувствительный предусилитель на керамической подложке. Детектирующие карты монтируются на длинные (до 4.6 м) многослойные печатные платы. На одну плату монтируется до 56 карт, так что по плате проходит до 112 сигнальных линий. Время формирования сигнала в линиях — 50–100 нс, что сопоставимо с периодичностью сведения пучков в точке взаимодействия установки — 96 нс.

Диоды занимают около половины площади платы. Полное перекрытие площади достигается наложением двух плат таким образом, что диоды на

одной плате перекрывают предусилители на другой. Сборка двух палочных плат в жёстком алюминиевом каркасе составляет так называемую “лыжу”. Три лыжи вместе со считывающей электроникой составляют модуль сепаратора. В передней и задней частях калориметра установлено по 20 модулей. Площадь, перекрываемая активной поверхностью диодов всех модулей, составляет около 85% площади, закрываемой сепаратором.

Считывающая электроника сепаратора синхронизирована с трёхуровневой триггерной системой установки ZEUS. Сигналы с зарядочувствительных предусилителей детектирующих карт поступают на формирователь импульсов. Верхний предел динамического диапазона усилителей — свыше 1000 сигналов МИЧ. Время формирования импульса составляет 180 нс. Амплитуды импульсов дискретизируются каждые 96 нс (4 значения амплитуды на канал), сохраняются в микросхемах многоканальной аналоговой памяти (pipeline) и в соответствии с реперными триггерами передаются на аналоговый мультиплексор (24 канала), аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) и далее на цифровой процессор, который на основании четырёх значений амплитуд и калибровочных констант вычисляет энерговыделение и время сигналов в каналах. Конструктивно микросхемы формирователя, памяти и мультиплексора объединены в аналоговую карту, на вход каждой из которых подаются сигналы 48 каналов. Аналоговые карты вместе с системами распределения питания, контроля (мониторинга) параметров детектора и генераторами тестовых (калибровочных) импульсов размещены на несущих конструкциях наверху калориметра (фронтальная электроника). Цифровые карты, объединяющие АЦП и процессор, размещаются отдельно. После того, как процессором отбрасываются сигналы, не превышающие по величине 40% сигнала МИЧ, в цепь сбора и обработки данных эксперимента попадает информация о приблизительно 5% от общего числа каналов.

Калибровка электроники сепаратора осуществляется путем подачи тестовых импульсов на предусилители детектирующих карт. Хорошей проверкой калибровки в рабочих условиях послужило измерение сигнала мюонов, рождающихся в гало протонного пучка ускорителя. Энерговыделение

МИЧ составляет 120 кэВ. Энергетические спектры, измеренные на тестовых пучках в CERN, подтвердили принципиальную возможность разделения электронов и адронов по энерговыделению в сепараторе. Однако в рабочих условиях надежная идентификация сигнала МИЧ затруднена из-за присутствия шумов на уровне 40–60% от этого сигнала.

Во время сеансов сбора данных установки с использованием автоматизированных процедур проводится постоянный мониторинг параметров детектора. Доля неисправных каналов поддерживается на уровне не превышающем 2–6% от общего их числа.

На тестовых пучках разрешение при восстановлении координат составило около 5 мм. Изучение рабочих характеристик сепаратора в инклюзивном анализе процессов ГНР показало, что в случае отождествления кластеров в калориметре, идентифицированных там как электромагнитных, с кластерами в сепараторе при восстановлении углов рассеянных электронов достигается улучшение разрешения в 2 раза. Таким образом использование сепаратора позволяет заметно улучшить реконструкцию кинематики.

Автором диссертации проведена работа необходимая для включения вычисленных на этапе реконструкции энерговыделений в сепараторе в анализ данных по неупругому электророждению J/ψ -мезонов. При этом согласованным образом использовалось разработанное для этого программное обеспечение, включая моделирование неисправных каналов. Это позволило в большинстве событий использовать сепаратор для реконструкции положения рассеянного электрона, сохраняя при этом хорошее описание данных моделированием.

Для контроля качества данных сепаратора автором реализован веб-интерфейс, позволяющий получить информацию о состоянии детектора (по данным системы сбора и обработки данных) и распределение энерговыделений в обеих его частях для любого заданного сеанса работы установки.

Измерение неупругого электророждения чармония

В четвёртой главе детально описывается процедура анализа неупругого рождения J/ψ -мезонов в процессах ГНР: отбор событий с подавлением (и последующим вычитанием) дифракционного фона, моделирование, реконструкция кинематики, изучение эффективности реконструкции мюонов распада J/ψ -мезонов, вычисление сечений и систематических неопределённостей. Измерения соответствуют интегральной светимости $\mathcal{L} = 109 \text{ пбн}^{-1}$ и проводятся в номинальной кинематической области $2 < Q^2 < 80 \text{ ГэВ}^2$, $50 < W < 250 \text{ ГэВ}$, $0.2 < z < 0.9$ и $-1.6 < Y_{\text{л.с.}} < 1.3$, а также дополнительной области $2 < Q^2 < 100 \text{ ГэВ}^2$, $50 < W < 225 \text{ ГэВ}$, $0.3 < z < 0.9$ и $p_T^{*2} > 1 \text{ ГэВ}^2$, в которой ¹⁾ проводится прямое сравнение с данными эксперимента N1. Измеренные сечения сравниваются с теоретическими расчётами в рамках полужёсткого подхода и нерелятивистской КХД с учётом синглетных и октетных вкладов. При сравнении данных с теоретическими вычислениями оцениваются и учитываются вклады от процессов рождения $\psi(2S)$ - и B -мезонов с последующим распадом в J/ψ -мезон.

Отбор событий на уровне триггера установки основывается на требовании присутствия кластера в калориметре, соответствующего рассеянному электрону, а также идентификации в средних или задних внутренних мюонных камерах по крайней мере одного мюона, отождествленного с треком в центральном трековом детекторе. При отборе событий с использованием полной информации, доступной после окончательной реконструкции, дальнейшие требования налагаются с целью повышения надежности реконструкции рассеянного электрона, т.е. снижения примеси событий фоторождения, в которых рассеянный электрон покидает детектор через ускорительный канал; отбора неупругих событий, характеризующихся, в отличие от дифракционных событий и событий с дифракционной диссоциацией протона, промежуточными значениями неупругости (z), большими величинами массы адронной системы в конечном состоянии и большими множественностями треков; отбора событий с J/ψ -мезоном, идентифицируемого

¹⁾Символ * означает определение переменной (в данном случае поперечного импульса J/ψ -мезона) в с.л.м. обменного фотона и протона.

по наличию пары разнозаряженных мюонов (относительная вероятность моды распада $B \approx 6\%$).

Основными величинами, требуемыми для экспериментальной реконструкции кинематики события, являются энергия и угол рассеянного электрона, а также импульсы J/ψ -мезона и полной адронной системы в конечном состоянии.

Параметры рассеянного электрона измеряются в калориметре и уточняются с помощью адрон-электронного сепаратора, а при малых углах рассеяния также с помощью стрипового сцинтилляционного детектора. Энергия рассеянного электрона с достаточной точностью есть энергия отождествляемого с ним кластера в калориметре. Угол рассеянного электрона восстанавливается по положению кластера на внутренней поверхности заднего калориметра и реконструированной вершине события. В случае успешного отождествления кластера рассеянного электрона в калориметре и кластера в адрон-электронном сепараторе для определения положения рассеянного электрона используются координаты кластера в сепараторе. Если кластер в сепараторе отсутствует, но возможно использование стрипового сцинтилляционного детектора, то координаты уточняются с помощью этого детектора. Частота, с которой использовался каждый из трёх компонент установки при восстановлении координат рассеянного электрона, удовлетворительно воспроизводятся моделированием.

Комбинированная информация от трекового детектора и калориметра используется для реконструкции адронной системы. Особое внимание уделяется правильному учёту импульса мюонов распада J/ψ -мезона в полном импульсе адронной системы.

Качество реконструкции кинематики событий оценивается с помощью Монте-Карло моделирования событий и отклика детектора. Моделирование по методу Монте-Карло также используется для оценки эффективности детектора, триггера и реконструкции, а также введения соответствующих корректирующих факторов в каждом интервале изучавшихся кинематических переменных (аксептанс). Типичные значения аксептанса — 10–20%. Моделирование используется также для оценки примесей и фоно-

вых событий. С помощью моделирования рассчитываются радиационные поправки, а также осуществляется коррекция сечений к единой энергии в с.с.м. $\sqrt{s} = 318$ ГэВ. Значения радиационные поправок, а также величины коррекций к единой энергии всюду по абсолютной величине не превосходят 7%.

Спектры инвариантных масс мюонных пар после наложения всех требований отбора показаны на рис. 1 для номинальной (сверху) и дополнительной (снизу) кинематических областей. Число мезонов определяется подгонкой методом максимального правдоподобия, причем функция правдоподобия строится для дискретного набора измеренных масс и соответствующих им кинематических переменных. Для описания сигнала используется “модифицированная” функция Гаусса, для описания нерезонансного фона — линейная функция. Модифицированная функция Гаусса имеет вид:

$$\exp[-0.5 \cdot x^{1+1/(1+0.5x)}],$$

где $x = |M_{\mu^+\mu^-} - M_0|/\sigma$. Функция была введена для учета отклонения от гауссовых форм резонансных сигналов на хвостах распределений. Чтобы избежать переоценки фона при подгонке, из рассмотрения исключается интервал инвариантных масс $3.6 < M_{\mu^+\mu^-} < 3.8$ ГэВ в окрестности номинальной массы мезона $\psi(2S)$. Величины нормировок функций, положение сигнального пика M_0 и ширина пика σ являются свободными параметрами подгонки. При вычислении дифференциальных распределений по кинематическим переменным процедура подгонки повторяется в каждом интервале распределения. В числе J/ψ -мезонов, реконструированных таким образом, содержится остаточная примесь событий с дифракционной диссоциацией протона. До вычисления сечений эта примесь вычитается согласно предсказаниям Монте-Карло моделирования.

В результате полное сечение в номинальной кинематической области с учётом описанных поправок составляет

$$302 \pm 23(\text{стат.})_{-20}^{+28}(\text{сист.}) \text{ пбн},$$

где первая указанная неопределённость — статистическая, а остальные — систематические. Установлено три основных источника систематических

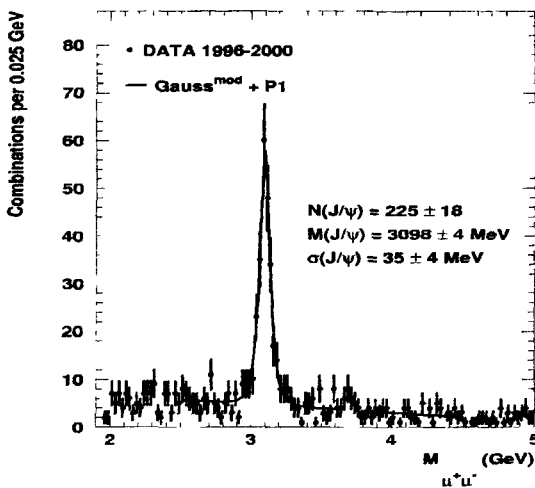
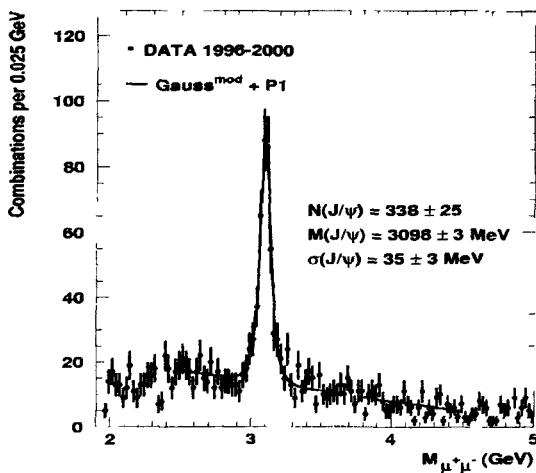


Рис. 1. Спектры инвариантных масс мюонных пар после наложения всех требований отбора в номинальной (сверху) и дополнительной (снизу) кинематических областях.

неопределённостей: реконструкция мюонов (включая эффективности мюонных камер и триггера) – 6% от полного сечения; вычисление акцептанса – 5%; вычитание дифракционного фона – 3%. Неопределённости нормировки, связанные с точностью измерения интегральной светимости (2%) и величины относительной вероятности мюонной моды распада J/ψ -мезона (1.7%), при вычислении полных систематических неопределённостей не учитываются.

Примесь J/ψ -мезонов от распадов $\psi(2S)$ -мезонов может составлять, как это было показано в экспериментальном анализе неупругого фоторождения J/ψ -мезонов, около 15%, что согласуется с теоретическими ожиданиями. Оценка, проведенная в настоящем анализе, также согласуется с этой величиной. Предполагается, что соответствующие дифференциальные распределения совпадают с распределениями, имеющими место в процессах прямого рождения J/ψ -мезонов, т.е. учет примеси сводится к перенормировке сечений. Дифференциальные распределения J/ψ -мезонов от распадов B -мезонов были получены как результат Монте-Карло моделирования, нормированного на измеренное экспериментом ZEUS сечение электроорождения рождения b -кварков. Интегрально данная примесь составила около 6%, будучи при этом около 20% при малых значениях переменной z . При сравнении данных с результатами теоретических расчетов обе примеси добавлялись к результатам этих расчетов.

Результаты сравнения экспериментальных сечений неупругого электроорождения J/ψ -мезонов с теоретическими расчётами показаны на рис. 2–5. В этих рисунках сечения в данных показаны в сравнении с предсказаниями NRQCD с учётом (белые прямоугольники) и без учёта (серые прямоугольники) октетных вкладов; расчётом в рамках модели CSM в полужёстком подходе с неинтегрированным глюонным распределением в форме KMS (пунктирная гистограмма); предсказаниями, полученными с помощью программы Cascade, в которой для начального глюонного каскада реализована эволюция SCFM (штрихпунктирная гистограмма). Штриховой гистограммой показаны распределения J/ψ -мезонов от распадов B -мезонов, полученные как результат Монте-Карло моделирования.

На рис. 6 экспериментальные сечения сравниваются с аналитическими расчётами в полужёстком подходе, в которых используются три разные параметризации неинтегрированных глюонных распределений: KMS (сплошная гистограмма), JB (пунктирная гистограмма) и KMR (штрихпунктирная гистограмма). Тем самым возможно оценить степень неопределённости полученных результатов, связанную с неинтегрированными глюонными распределениями, а также степень адекватности данным исследуемых параметризаций.

Следует отметить, что расчёты в лидирующем порядке теории возмущений в коллинеарном подходе с учётом только синглетных вкладов в целом согласуются с измерениями, но предсказывают более мягкий по сравнению с данными спектр по поперечному импульсу. Учёт октетных вкладов приводит к переоценке полного сечения. С учётом октетных вкладов не описываются формы чувствительных к механизмам рождения J/ψ -мезонов спектров по неупругости (z) события, инвариантной массе ($\lg(M_X^2/\text{ГэВ}^2)$) и быстрой (Y_X) адронной системы. В то же время спектр по поперечному импульсу при наличии ограничения на этот импульс ($p_T^{*2} > 1 \text{ ГэВ}^2$) описываются лучше, чем при учёте только синглетных вкладов.

Исследования процессов фоторождения J/ψ -мезонов показали, что в коллинеарном подходе согласие с данными расчёта в модели цветных синглетов (CSM) улучшается при учёте высших поправок (NLO) теории возмущений, а согласие с данными расчёта в рамках нерелятивистской КХД (NRQCD) с синглетными и октетными вкладами улучшается использованием процедур суммирования логарифмических поправок, связанных с описанием процесса обесцвечивания пары очарованных кварков. Однако для случая процессов ГНР таких расчётов пока не существует.

Сравнение полученных в данной работе результатов с аналитическими расчётами в полужёстком подходе показало, что предсказания, основанные на уравнениях эволюции ВФКЛ, в рамках модели цветных синглетов хорошо описывают экспериментальные данные. Также в рамках модели цветных синглетов предсказания, полученные с помощью программы Cascade, реализующей эволюцию SCFM, переоценивают полное сечение, но хорошо

описывают формы спектров в данных.

Полученные экспериментальные данные и проведённое сравнение с широким спектром теоретических предсказаний продемонстрировали отсутствие необходимости учёта дополнительных вкладов процессов, в которых обесцвечивание пары очарованных кварков происходит при испускании мягких глюонов (октетных вкладов).

Заключение

В заключении приводятся результаты, полученные в диссертации и выносимые на защиту:

1. Проведена работа необходимая для включения в анализ данных полупроводникового адрон-электронного сепаратора установки ZEUS. Исследована степень влияния данных сепаратора на реконструкцию переменных, используемых в анализе. Усовершенствована процедура мониторинга качества данных сепаратора.
2. Впервые в эксперименте ZEUS проведено измерение неупругого рождения J/ψ -мезонов в процессах глубоконеупругого рассеяния. Измерение проведено в кинематической области $2 < Q^2 < 80 \text{ ГэВ}^2$, $50 < W < 250 \text{ ГэВ}$, $0.2 < z < 0.9$ и $-1.6 < Y_{\text{д.с.}} < 1.3$. Сечения рождения J/ψ -мезонов получены в более широкой кинематической области по сравнению с той, которая использовалась экспериментом H1, также работающем на коллайдере HERA. Впервые для процессов $e p \rightarrow e' J/\psi X$ измерены параметры адронной системы X в конечном состоянии: инвариантной массы M_X и быстроты Y_X . При сравнении с теоретическими расчётами были учтены вклады от распадов $\psi(2S)$ - и B -мезонов.
3. Было проведено сравнение измеренных сечений с теоретическими предсказаниями в коллинеарном подходе. Расчёты в лидирующем порядке теории возмущений в коллинеарном подходе с учётом только синглетных вкладов в целом согласуются с измерениями, но предска-

зывают более мягкий спектр по поперечному импульсу по сравнению с данными. Учёт октетных вкладов приводит к переоценке полного сечения по сравнению с данными. С учётом октетных вкладов не описываются формы чувствительных к механизмам рождения J/ψ -мезонов спектров по неупругости (z) события, инвариантной массе ($\lg(M_X^2/\text{ГэВ}^2)$) и быстроте (Y_X) адронной системы. В то же время спектр по поперечному импульсу при наличии ограничения на этот импульс ($p_T^{*2} > 1 \text{ ГэВ}^2$) описываются лучше, чем при учёте только синглетных вкладов.

4. Было проведено сравнение измеренных сечений с теоретическими предсказаниями в рамках модели цветowych синглетов, в которых на уровне партонной динамики учитывается ненулевая виртуальность (поперечный импульс) начального глюона. Сравнение с аналитическими расчётами в полужёстком подходе показало, что предсказания, основанные на уравнениях эволюции BFKL, хорошо описывают экспериментальные данные. Предсказания, полученные с помощью программы Cascade, в которой для начального глюонного каскада реализована эволюция CCFM с функцией расщепления глюона, содержащей несингулярные члены, переоценивают полное сечение, но хорошо описывают формы спектров в данных.
5. Полученные экспериментальные данные и проведённое сравнение с широким спектром теоретических предсказаний продемонстрировали отсутствие необходимости учёта дополнительных вкладов процессов, в которых обесцвечивание пары очарованных кварков происходит при испускании мягких глюонов (октетных вкладов).
6. Было проведено дополнительное измерение сечений рождения J/ψ -мезонов в кинематической области $2 < Q^2 < 100 \text{ ГэВ}^2$, $50 < W < 225 \text{ ГэВ}$, $0.3 < z < 0.9$ и $p_T^{*2} > 1 \text{ ГэВ}^2$. Полученные результаты находятся в согласии с измерениями, проведёнными экспериментом H1.

ZEUS

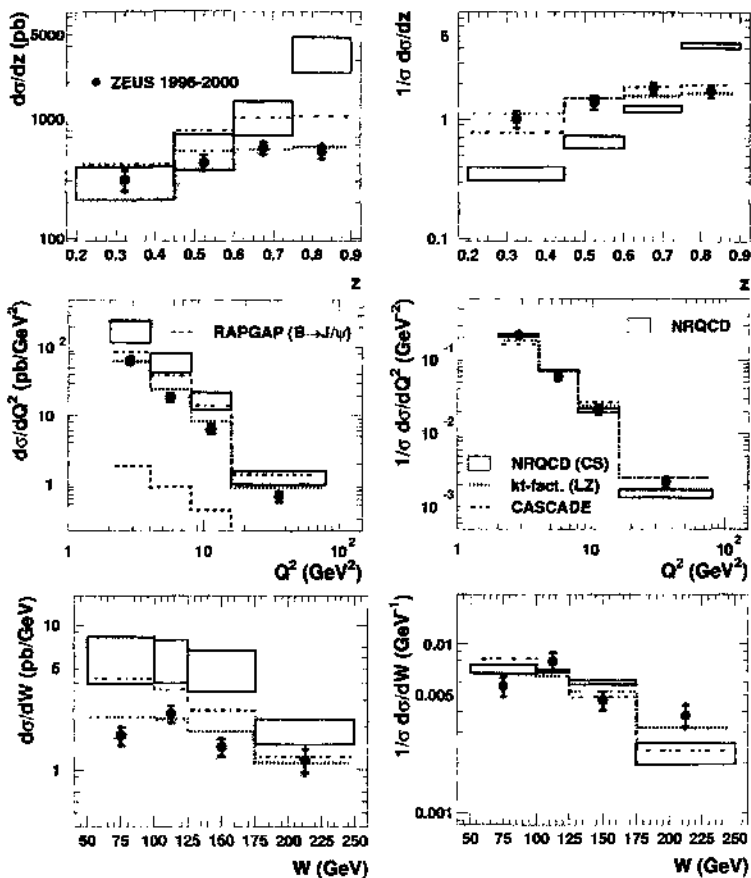


Рис. 2 Ненормированные и нормированные на единичную площадь дифференциальные сечения рождения J/ψ -мезонов в процессах ГНР в кинематической области $2 < Q^2 < 80 \text{ ГэВ}^2$, $50 < W < 250 \text{ ГэВ}$, $0.2 < z < 0.9$ и $-1.6 < Y_{J/\psi} < 1.3$. Сечения показаны в зависимости от z , Q^2 и W . Планки погрешностей сечений в данных (\bullet) разделены на две части: внутренняя часть — статистическая ошибка, внешняя часть — статистическая ошибка и систематическая неопределённость сложенные в квадратурах. Описание теоретических расчётов см. в тексте.

ZEUS

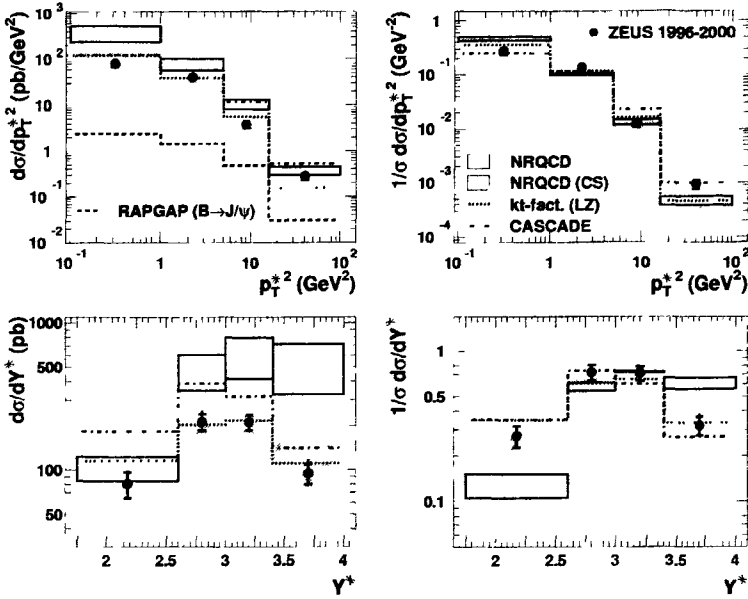


Рис. 3. Ненормированные и нормированные на единичную площадь дифференциальные сечения рождения J/ψ -мезонов в процессах ГНР в кинематической области $2 < Q^2 < 80 \text{ ГэВ}^2$, $50 < W < 250 \text{ ГэВ}$, $0.2 < z < 0.9$ и $-1.6 < Y_{\text{л.с.}} < 1.3$. Сечения показаны в зависимости от p_T^{*2} и Y^* . Планки погрешностей сечений в данных (●) разделены на две части: внутренняя часть — статистическая ошибка, внешняя часть — статистическая ошибка и систематическая неопределённость сложенные в квадратурах. Описание теоретических расчётов см. в тексте.

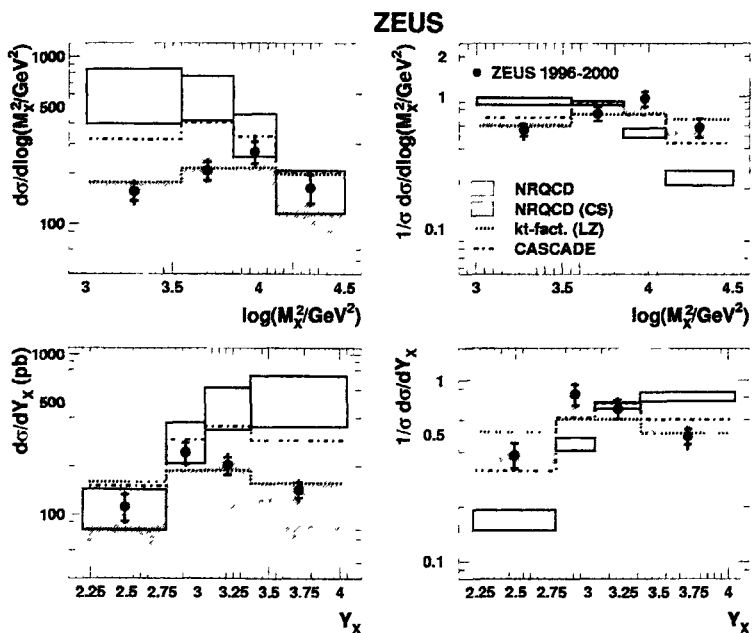


Рис. 4. Ненормированные и нормированные на единичную площадь дифференциальные сечения рождения J/ψ -мезонов в процессах ГНР в кинематической области $2 < Q^2 < 80 \text{ ГэВ}^2$, $50 < W < 250 \text{ ГэВ}$, $0.2 < z < 0.9$ и $-1.6 < Y_{\text{н.с.}} < 1.3$. Сечения показаны в зависимости от $\lg(M_X^2/\text{ГэВ}^2)$ и Y_X . Планки погрешностей сечений в данных (\bullet) разделены на две части: внутренняя часть — статистическая ошибка, внешняя часть — статистическая ошибка и систематическая неопределённость сложенные в квадратах. Описание теоретических расчётов см. в тексте.

ZEUS

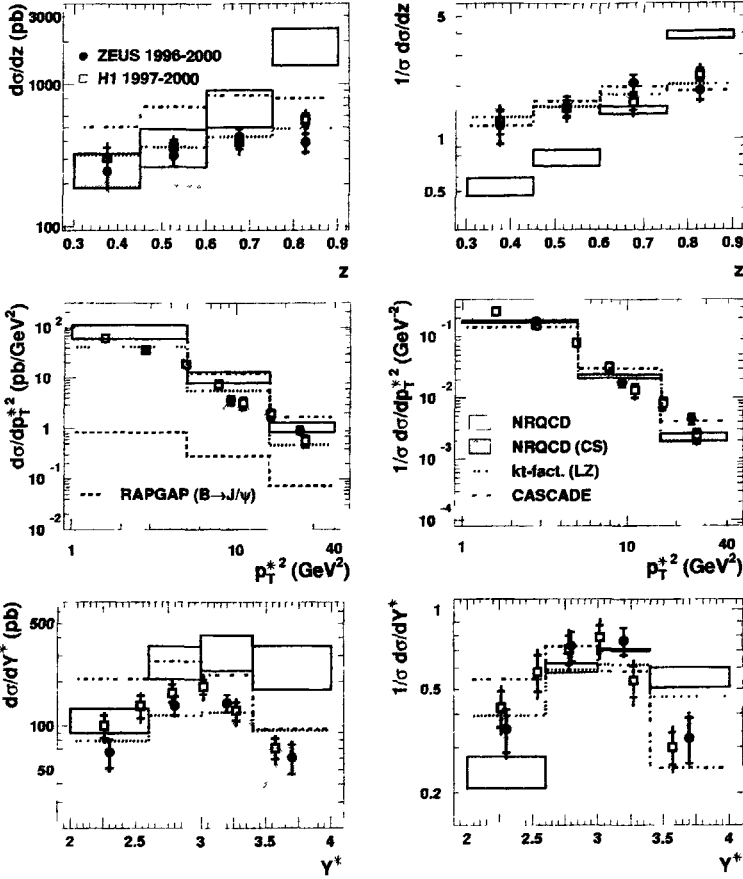


Рис. 5. Ненормированные и нормированные на единичную площадь дифференциальные сечения рождения J/ψ -мезонов в процессах ГНР в кинематической области $2 < Q^2 < 100 \text{ ГэВ}^2$, $50 < W < 225 \text{ ГэВ}$, $0.3 < z < 0.9$ и $p_T^{*2} > 1 \text{ ГэВ}^2$. Сечения показаны в зависимости от z , p_T^{*2} и Y^* . Планки погрешностей сечений в данных (\bullet — данные ZEUS, \square — данные H1) разделены на две части: внутренняя часть — статистическая ошибка, внешняя часть — статистическая ошибка и систематическая неопределённость сложенные в квадратурах. Описание теоретических расчётов см. в тексте.

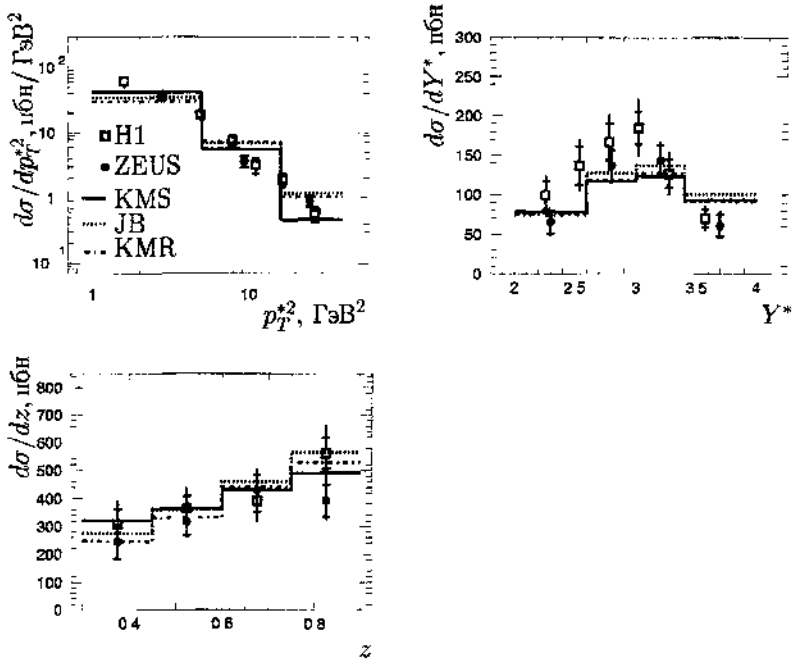


Рис. 6. Дифференциальные сечения рождения J/ψ -мезонов в процессах ГНР в кинематической области $2 < Q^2 < 100 \text{ ГэВ}^2$, $50 < W < 225 \text{ ГэВ}$, $0.3 < z < 0.9$ и $p_T^{*2} > 1 \text{ ГэВ}^2$. Сечения показаны в зависимости от p_T^{*2} , Y^* и z . Планки погрешностей сечений в данных (\bullet — данные ZEUS, \square — данные H1) разделены на две части: внутренняя часть — статистическая ошибка, внешняя часть — статистическая ошибка и систематическая неопределённость сложенные в квадратурах. Гистограммами показаны результаты расчётов в рамках полужёсткого подхода с неинтегрированными глюонными распределениями в форме KMS, JB и KMR (подробнее см. текст).

Литература

- [1] Göttlicher P. (for the ZEUS-HES Group). The ZEUS hadron electron separator, performance and experience // Proc. of 10th International Conference on Calorimetry in High Energy Physics (CALOR 2002) / R.-Y. Zhu (ed.). — Pasadena, California, 25–30 March 2002. — P. 296–303.
- [2] Katkov I. (for the ZEUS Collaboration). Inelastic photo- and electroproduction of charmonium // Proc. of 11th International Workshop on Deep Inelastic Scattering (DIS 2003) / V.T. Kim and L.N. Lipatov (eds.). — St. Peterburg, Russia, 23–27 April 2003. — P. 663–667.
- [3] ZEUS Collab. (Chekanov S., ... Katkov I.I., ... *et al.*). Measurement of Inelastic J/ψ Production in Deep Inelastic Scattering at HERA // The European Physical Journal C. — 2005. — Vol. 44. — P. 13–25.
- [4] Зотов Н.П., Катков И.И. и Липатов А.В. Исследование неупругого электророждения J/ψ -мезонов на коллайдере HERA в полужёстком подходе КХД: Препринт — 2005-18/784. НИИЯФ МГУ, 2005. — 29 с.
- [5] Катков И.И. и Кузьмин В.А. Применение метода вероятностной функции фазового пространства к изучению рождения J/ψ -мезонов на электрон-протонном коллайдере HERA в эксперименте ZEUS: Препринт — 2006-1/800. НИИЯФ МГУ, 2006. — 19 с.

Подписано в печать 07.04.2006
Формат 60×88 1/16. Объем 1.5 п.л.
Тираж 100 экз. Заказ № 509
Отпечатано в ООО «Соцветие красок»
119992 г.Москва, Ленинские горы, д.1
Главное здание МГУ, к.102

2006 A

7613

№ - 7613