



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

2001–1

На правах рукописи

Алёхин Сергей Иванович

**РАЗВИТИЕ МЕТОДА УЧЕТА КОРРЕЛЯЦИЙ
СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ОШИБОК
В АНАЛИЗЕ ДАННЫХ
ПО ГЛУБОКОНЕУПРУГОМУ РАССЕЯНИЮ
ЛЕПТОНОВ**

01.04.23 — физика высоких энергий

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико–математических наук

Протвино 2001

УДК 539.1.01

Работа выполнена в Институте физики высоких энергий (г.Протвино).

Научные руководители: член–корреспондент РАН, доктор физико–математических наук, С.С. Герштейн (ИФВЭ), доктор физико–математических наук А.Л. Катаев (ИЯИ РАН).

Официальные оппоненты: доктор физико–математических наук Э.Э. Боос (НИИЯФ МГУ), доктор физико–математических наук А.К. Лиходед (ИФВЭ).

Ведущая организация – Объединённый институт ядерных исследований, ЛТФ (г. Дубна).

Защита диссертации состоится “_____” _____ 2001 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д034.02.01 при Институте физики высоких энергий по адресу: 142281, Протвино Московской обл.).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Автореферат разослан “_____” _____ 2001 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д034.02.01

Ю.Г. Рябов

© Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий, 2001

Общая характеристика работы

Современное состояние физики частиц таково, что только небольшая часть экспериментальной информации может быть непосредственным образом сопоставлена с простыми и яркими предсказаниями новых и активно изучаемых теоретических и феноменологических схем. Большая часть данных описывается зависимостями, которые включают неизвестные эффекты только как поправки (и зачастую незначительные по величине) к хорошо установленным соотношениям. В результате, весьма насущными для изучения новой физики становятся прецизионные измерения процессов, в том числе и ранее изученных, что и можно проследить в тенденциях экспериментальной ситуации в последние годы.

Надо заметить, что благодаря значительному прогрессу в увеличении светимостей ускорителей и ускорению процесса обработки, современные эксперименты получают возможность накопить огромные объемы данных и свести свои статистические ошибки к очень небольшим значениям, так что доминирующими становятся систематические ошибки, связанные с погрешностями аппаратуры.

Глубоконеупругое рассеяние (ГНР) лептонов служит ярким примером такой ситуации. Эксперименты в этой области были иници-

ированы в SLAC в 1969 г. и впоследствии послужили уникальным источником информации о партонных распределениях в нуклоне и о величине бегущей константы сильного взаимодействия α_s . С тех пор были выполнены многочисленные аналогичные эксперименты на фиксированных мишенях, в том числе и в нейтринных пучках на ускорителе ИФВЭ У-70. В настоящее время продолжают набирать статистику два эксперимента на встречных электрон-протонных пучках на ускорителе HERA.

Из-за различных методических проблем многие данные, полученные на фиксированных мишенях, оказались неточными и были отбракованы в ходе последующего феноменологического анализа. Оставшиеся данные для протонной и дейтронной мишеней представляют особый интерес для извлечения партонных распределений и величины α_s , так как в этом случае не требуется дополнительного моделирования ядерных эффектов для тяжелых мишеней. Дополнительные ограничения на параметры партонных распределений могут быть также получены на основе недавно опубликованных результатов высокостатистического нейтринного эксперимента группы CCFR.

Для всех этих экспериментов статистические ошибки сечений составляют порядка 1% и существенно меньше систематических ошибок, так что именно последние определяют экспериментальные неопределённости феноменологических параметров, извлекаемых из данных. Дополнительная необходимость учёта систематических ошибок в анализе данных по ГНР связана с тем, что в каждом отдельном эксперименте практически невозможно перекрыть всю кинематическую область, необходимую для феноменологического анализа партонных распределений, и поэтому особо важен совместный анализ всех имеющихся данных, а в анализе такого рода данные разных экспериментов могут быть (и действительно часто бывают) совместимы только в пределах разброса этих систематических ошибок.

Тем не менее при анализе данных по ГНР учёт систематических ошибок зачастую либо неоправданно упрощен, либо вовсе игнорируется. Так, например, группы авторов MRST и CTEQ, разработавшие

популярные параметризации партонных распределений, существенно опирающиеся на данные по ГНР, вообще не приводят погрешностей своих параметризаций, связанных с ошибками данных. Более того, при анализе данных эти группы используют упрощённый способ учёта систематических ошибок, квадратуруя их со статистическими. Несмотря на сопутствующие утверждения о том, что такой подход не сильно влияет на результаты, очевидно, что исчерпывающий анализ такого влияния не проводится, и параметры получаемых партонных распределений могут быть смещены.

Некоторые экспериментальные группы, анализируя собственные данные с привлечением аналогичных данных других групп, учитывают корреляции данных, связанные с систематическими ошибками, однако в случае большого числа независимых источников систематических ошибок или делают упрощающие предположения о структуре этих корреляций, или искусственно ограничивают набор анализируемых данных. Такая практика сложилась частично по историческим причинам, а частично вследствие того, что в отличие от статистических ошибок, возможные подходы при учёте систематических ошибок не так однозначны и сопряжены с техническими трудностями. Поэтому задача разработки удобных и эффективных подходов к учёту систематических ошибок при анализе данных по ГНР является весьма **актуальной**.

Целью диссертационной работы являются разработка и применение методов учёта систематических ошибок при анализе данных по ГНР лептонов, имеющих отношение к извлечению параметров партонных распределений в нуклоне, вкладов высших твистов и величины α_s . Эти параметры необходимы для всех расчётов жёстких процессов с участием нуклонов, и поэтому имеют и будут иметь применение в большом числе различных прецизионных феноменологических сопоставлений с данными на предмет изучения новых и уточнения известных эффектов (например, наблюдение составленности в протон-протонных и электрон-протонных столкновениях, рекомбинация партонных в малых x , точное измерение масс промежуточных бозонов в антипротон-протонных столкновениях и т.д.).

Автор защищает:

- Исследование свойств оценивающей функции, использующей ковариационную матрицу и анализ условий несмещённости оценок, полученных с помощью этой функции.
- Исследование численной устойчивости минимизации функционалов вида χ^2 и метод улучшения этой устойчивости.
- Результаты анализа данных глубоконеупругого рассеяния заряженных лептонов. Извлечение из этих данных величины константы сильного взаимодействия и партонных распределений с учётом систематических ошибок данных.

Научная новизна и практическая ценность. В качестве базового метода при решении поставленной задачи учёта систематических ошибок используется байесовский подход к определению понятия вероятности, обладающий концептуальной последовательностью при построении вероятностной модели данных и позволяющий минимизировать технические трудности, связанные с обработкой коррелированных данных. Разработан набор программ, реализующий полуаналитический метод минимизации и аналитические формулы вычисления дисперсии настраиваемых параметров и позволяющий проводить быстрые и точные вычисления даже для больших наборов данных, что делает этот набор эффективным инструментом при глобальных подгонках.

Впервые в анализе глобального набора данных по ГНР была получена параметризация полного набора партонных распределений, включающая оценку их экспериментальных неопределённостей. Наличие этих оценок делает возможным осмысленное сравнение наборов партонных распределений, полученных из анализа различных процессов.

При оценке потенциала нового ускорителя в регистрации новых физических эффектов необходима оценка ошибок сечений жёстких процессов, связанная с неопределённостями партонных распределений. Поэтому полученные партонные распределения уже используются при планировании экспериментов на коллайдере LHC.

Апробация работы

Диссертация основана на результатах исследований, выполненных автором в 1994—1999 гг. в Отделе адронной физики ИФВЭ. Основные результаты исследований, вошедших в диссертацию, опубликованы в виде препринтов ИФВЭ и статей в журналах “*Physics Letters*”, “*European Physics Journal*”, “*Physical Review*”. Они докладывались на 34-й конференции серии “**Морионд**” (март 1999 г., Лес-Арк, Франция), 14-м Международном совещании НИИЯФ МГУ по квантовой теории поля и физике высоких энергий (май 1999 г., Москва, Россия), конференции “**Нуклон–99**” (июнь 1999 г., Фраскатти, Италия), 11-й конференции серии “**Блуа**” (июль 1999 г., Блуа, Франция), 9-й Ломоносовской конференции по физике элементарных частиц (сентябрь 1999 г., Москва, Россия), совещании по физике на коллайдере ЛНС (октябрь 1999 г., ЦЕРН), совещании по физике на нейтринном детекторе ОИЯИ-ИФВЭ (январь 2000 г., Дубна, Россия), на семинаре ИФВЭ (февраль 2000 г., Протвино, Россия), на международном семинаре “**Кварки–2000**” (май 2000 г., Пушкин, Россия) и на семинаре в университете Регенсбурга (декабрь 2000 г., Германия).

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения. Объем диссертации 125 страниц печатного текста, включая 27 рисунков и 16 таблиц; библиография составляет 127 ссылок.

Содержание работы

Во введении излагается постановка исследуемых проблем и обосновывается их актуальность. Кратко обсуждаются подходы, использовавшиеся при решении поставленных задач. Описана общая структура работы.

В первой главе описаны два подхода, применяемых в современной физике частиц для построения статистической модели при

анализе данных, коррелированных из-за наличия систематических ошибок — классический и байесовский. Для байесовского подхода, который далее используется в диссертации в качестве основного, наиболее естественной оценивающей функцией для анализа коррелированных данных является оценивающая функция, построенная на основе ковариационной матрицы (ОФКМ). Дается краткий обзор последних работ, посвященных анализу свойств оценок, основанных на ОФКМ и акцентирующих внимание на возможной смещенности этих оценок.

В разделе 1.1 описывается метод анализа статистических свойств, основанный на обращении разложения оценивающей функции вблизи точки минимума. С помощью этого метода выводятся аналитические формулы для дисперсии и смещения настраиваемых параметров, полученных с помощью упрощенной оценивающей функции (УОФ), основанной на минимизации χ^2 без явного учета корреляции данных. Проанализированы предельные случаи этих аналитических выражений и показана несостоятельность оценки, основанной на УОФ при анализе коррелированных данных. Сформулирован способ фильтрации данных, позволяющий уменьшить дисперсию настраиваемых параметров при применении УОФ.

В разделе 1.2 выводятся аналогичные формулы для дисперсии и смещения оценок настраиваемых параметров, полученных с помощью ОФКМ, и проводится сравнительный анализ статистических свойств ОФКМ и УОФ. Показано, что оценка, основанная на ОФКМ, состоятельна, и её дисперсия всегда меньше дисперсии оценки, основанной на УОФ. Это свойство иллюстрируется на примере анализа смоделированных данных, мотивированных упругим нуклон-нуклонным рассеянием, и на примере анализа реальных данных по ГНР мюонов, полученных группой BCDMS, проведенного в рамках лидирующего порядка КХД с целью извлечения партонных распределений и константы сильного взаимодействия α_s .

Результаты последнего сравнения приведены на рис. 1.

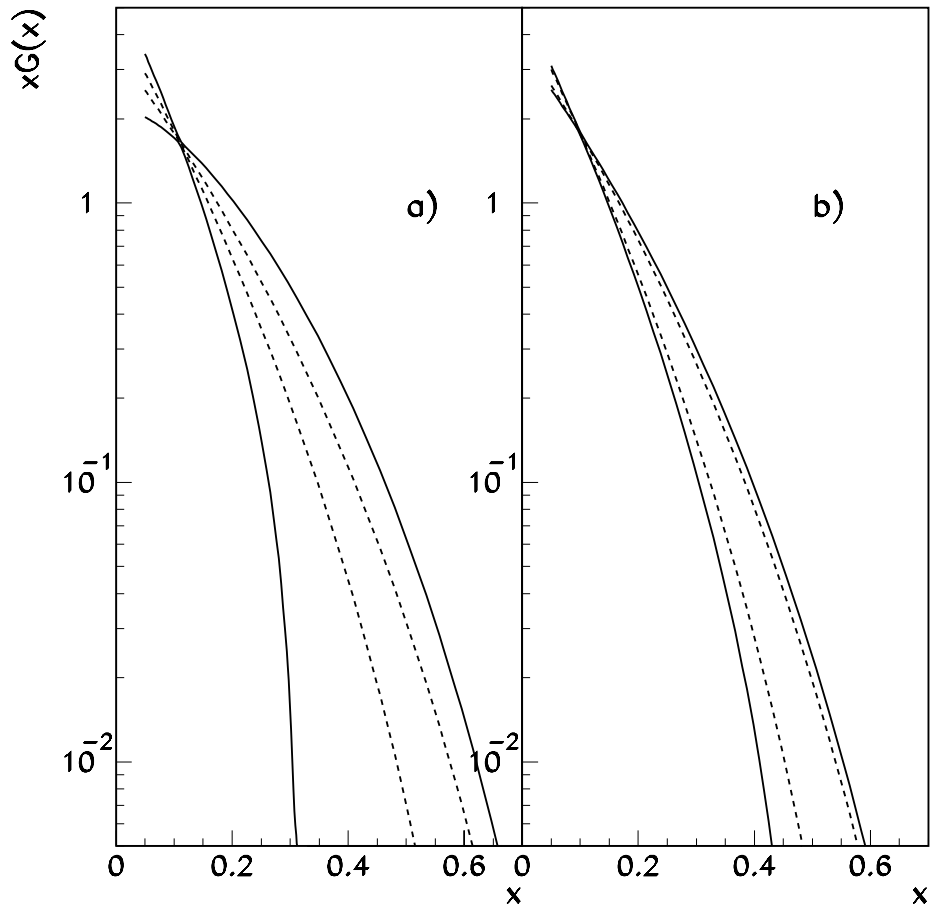


Рис. 1. Диапазон глюонного распределения, соответствующий одному стандартному отклонению, полученный в анализе данных группы BCDMS (a — УОФ, b — ОФКМ). Сплошные кривые соответствуют полным экспериментальным ошибкам, пунктир — только статистическим.

Из рисунка видно, что систематические ошибки доминируют при определении ошибки глюонного распределения при том, что стандартное отклонение для глюонного распределения, полученного с помощью ОФКМ, примерно вдвое меньше, чем полученное с помо-

щью УОФ. Аналогично, стандартное отклонение величины $\alpha_s(M_Z)$ для УОФ составляет 0.015, а для ОФКМ — 0.007. На основе анализа аналитических выражений для смещения оценок ОФКМ показано, что смещение этих оценок становится сравнимым с их стандартными отклонениями только в случае, если составляющая стандартного отклонения, соответствующая систематической ошибке, во много раз превышает составляющую, соответствующую статистической ошибке. Описываются простые методы контроля смещения оценки, не требующие его явного вычисления.

В разделе 1.3 приводятся аналитические формулы для вычисления дисперсии параметров в планируемом эксперименте и обсуждается статистическая устойчивость уровня достоверности интервала, соответствующего одному стандартному отклонению параметра при наличии систематических ошибок.

Вторая глава посвящена изучению численной устойчивости градиентных методов минимизации функционалов вида χ^2 . Очевидно, что при уменьшении ошибок данных для обеспечения стабильности вычисления производных таких функционалов по настраиваемым параметрам требуется улучшение точности вычислений модели, описывающей данные. Это не всегда возможно, или по крайней мере сильно затруднено, если модель основана на сложных вычислениях, например на многократном интегрировании.

В разделе 2.1 описывается полуаналитическая схема вычисления производных минимизируемого функционала по настраиваемому параметру. Приводятся две составляющие ошибки вычисления производных: регулярная, представляющая собой неточность конкретной разностной схемы, и случайная, возникающая из-за ошибок округления при вычислениях. Так как регулярная составляющая падает с уменьшением шага разностной схемы, а случайная растёт, то существует значение этого шага, обеспечивающее минимальную ошибку вычислений; величина этой минимальной ошибки и определяет устойчивость минимизации.

В разделе 2.2 приводятся аналитические формулы для ошибки вычисления оценки расстояния до минимума при минимизации

с использованием ньютоновского алгоритма, полученные на основе моделирования ошибок округления равномерным случайным распределением. На примере двухпараметрической параметризации показывается, что при наличии больших корреляций между параметрами ошибки вычисления существенно возрастают. Полученные формулы используются для формулирования критерия численной устойчивости процесса минимизации.

В разделе 2.3 на примере анализа данных по ГНР, полученных группой NMC, сравнивается численная устойчивость процесса минимизации при применении полуаналитической схемы и простой разностной схемы. Сравнение проводится как с помощью аналитических формул, полученных в разделе 2.2, так и на основе Монте-Карло генерации. Общий вывод, который делается из этого сравнения, состоит в том, что при подгонке к данным NMC феноменологической формулы для структурной функции для обеспечения сопоставимой численной устойчивости простая разностная схема требует точности вычисления подгоняемой модели на два порядка выше, чем полуаналитическая.

В разделе 2.4 анализируется влияние неточностей вычисления производных на устойчивость вычисления матрицы ошибок после достижения точки минимума. На рис. 2 сравниваются спектры собственных значений матрицы вторых производных, вычисленные программой минимизации MINUIT при помощи двух разностных схем в точке минимума, достигнутой при подгонке к данным NMC той же феноменологической формулы, что использовалась в разделе 2.3.

Так как формула сконструирована из элементарных функций, точность вычислений в данном случае весьма высока. Несмотря на это, как видно из рисунка, матрица вторых производных, вычисленная с помощью простой разностной схемы, не является положительно определенной, т.е. вычисление матрицы ошибок на её основе в отличие от полуаналитической схемы просто невозможно.

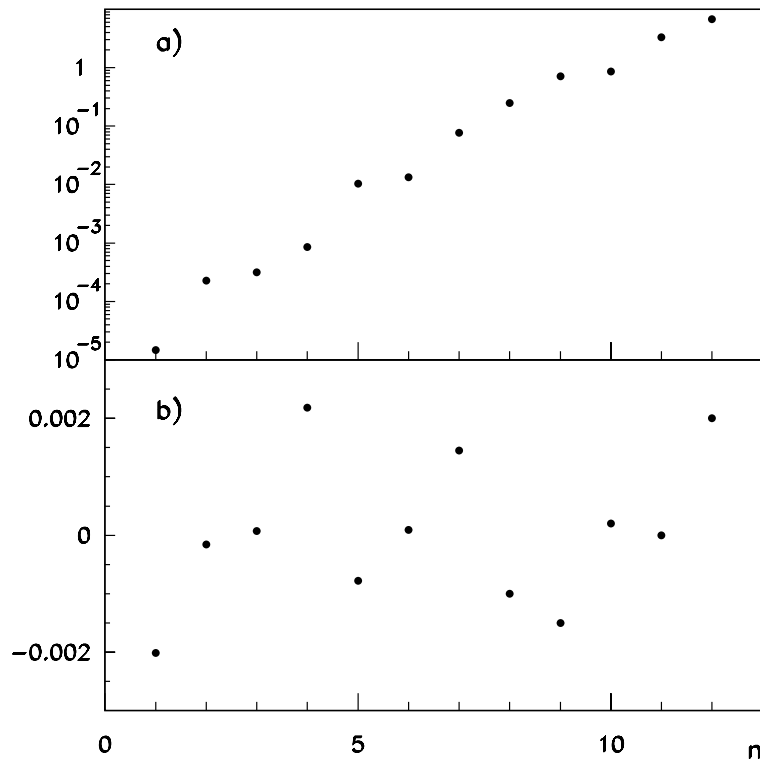


Рис. 2. Спектр собственных значений матрицы вторых производных, вычисленный с помощью полуаналитической схемы (а), и разность между собственными значениями, вычисленными с помощью простой и полуаналитической схем (b). Переменная n нумерует собственные значения в порядке возрастания.

Третья глава содержит результаты анализа данных по ГНР лептонов. Анализ проводился в рамках двухпетлевого приближения КХД с учётом систематических ошибок данных и с одновременным извлечением вклада твистов 4 и 6 в структурные функции $F_{2,3,L}$ величины α_s и затравочных партонных распределений.

В разделе 3.1 даётся описание феноменологии ГНР, включая модель инфракрасного ренормалона, учитывающую вклад высших твистов. Кратко описывается программа численного интегрирования

эволюционных уравнений КХД, применяемая далее в анализе. Приводятся результаты проверки точности этой программы, которые показывают, что она вполне достаточна для анализа современных данных по ГНР.

В разделе 3.2 на примере совместного анализа несинглетной части данных с ускорителя SLAC и группы BCDMS исследуется устойчивость величины α_s по отношению к процедурам учёта систематических ошибок. В качестве исходного подхода к учёту систематических ошибок принимается упрощённый подход, который состоит в том, что наибольшие по величине систематические ошибки объединяются в одну “основную систематическую ошибку”, а остальные систематические ошибки квадратируются со статистическими. Этот подход применялся в более раннем анализе данных SLAC-BCDMS, выполненном другими авторами, и в результате из подгонки двухпетлевых формул КХД к данным, включающим и синглетную часть, было получено значение

$$\alpha_s(M_Z) = (0.113 \pm 0.001)(\text{стат.} + \text{сист.}), \quad (1)$$

которое статистически значимо отличается от значений α_s , извлечённых из данных экспериментов на ускорителе LEP. В настоящем анализе при подгонке к несинглетным данным SLAC-BCDMS с применением этого упрощённого подхода к учёту систематических ошибок было получено значение $\alpha_s(M_Z) = (0.1089 \pm 0.0016)$ (стат. + сист.), совместимое с (1), однако при полном учёте корреляций данных, связанных с систематическими ошибками, это значение сместилось вверх примерно на четыре стандартных отклонения и стало равным

$$\alpha_s(M_Z) = (0.1180 \pm 0.0017)(\text{стат.} + \text{сист.}),$$

так что противоречие с результатами LEP исчезает, и, соответственно, отпадает необходимость интерпретации этого противоречия как проявления эффектов новой физики.

В разделе 3.3 описывается анализ несинглетных данных с ускорителя SLAC и групп BCDMS и NMC с целью извлечения вклада высших твистов в структурные функции F_2 и F_L . Вклад операторов

твиста 4 для удобства сравнения с предсказаниями ренормальной модели параметризуется в аддитивной форме, так что

$$F_{2,L}(x, Q) = F_{2,L}^{\text{LT, TMC}}(x, Q) + H_{2,L}(x) \frac{1 \text{ ГэВ}^2}{Q^2},$$

где $F_{2,L}^{\text{LT, TMC}}$ соответствует вкладу операторов лидирующего твиста с учётом поправок на массу мишени. В таком подходе $H_{2,L}$ описывают чисто динамический вклад твиста 4.

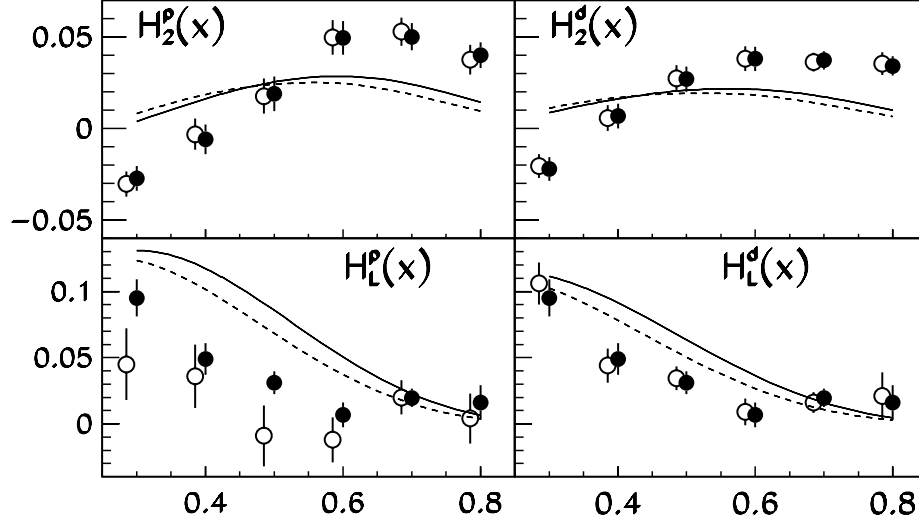


Рис. 3. Модельно независимые оценки H_2 и H_L (сплошные кружки — подгонка с условием $H_L^d = H_L^p$, открытые кружки — подгонка без этого условия). Для наглядности точки, соответствующие разным вариантам, смещены по оси x вправо и влево. Кривые соответствуют вычислениям по модели инфракрасного ренормалона для $Q^2 = 2 \text{ ГэВ}^2$ и эффективного числа фермионов $n_f = 3$ (сплошные линии) и $Q^2 = 9 \text{ ГэВ}^2, n_f = 4$ (пунктир).

На рис. 3 результаты подгонки, в которой $H_{2,L}$ параметризуется модельно-независимым образом кусочно-линейными функциями, сравниваются с предсказаниями несинглетного приближения ренормальной модели, абсолютная нормировка которых была вычислена

с использованием гипотезы наивной неабилитации. На основе этого сравнения делается вывод от том, что несинглетное приближение ренормальной модели качественно описывает H_L и по форме, и по абсолютной нормировке.

В то же время H_2 описывается этим приближением модели плохо, причём перенастройка нормировки не может улучшить это описание. По результатам этой же подгонки вклад операторов твиста 6 в F_2 и F_L в пределах экспериментальных ошибок совместим с нулём, хотя для F_2 он в целом смещён в положительные значения, а для F_L — в отрицательные. Отмечено, что коэффициенты корреляции величин α_s и H_2 , извлекаемых из анализа, достигают порядка -0.9 , что делает анализ неустойчивым по отношению к различным возмущениям установочных параметров и предположений, поэтому для прецизионного извлечения α_s и H_2 из данных по ГНР требуется тщательный учёт теоретических неопределённостей.

Величина H_L коррелирована с другими параметрами не так сильно, как H_2 , поэтому полученное значение H_L менее чувствительно к теоретическим неопределённостям анализа. Это особенно важно в силу того, что в различных теоретических моделях предсказания для вклада высших твистов в F_L вычисляются проще, чем для других структурных функций.

В разделе 3.4 на примере анализа данных по структурным функциям F_2 и F_3 для ГНР нейтрино на нуклоне, полученных группой CCFR, изучается чувствительность величины α_s , извлекаемой из подгонки к способу параметризации вклада высших твистов. Величина константы сильного взаимодействия, полученная самой группой CCFR из подгонки с параметризацией вклада высших твистов в рамках несинглетного приближения ренормальной модели, составляет

$$\alpha_s(M_Z) = (0.119 \pm 0.002)(\text{стат.} + \text{сист.}) \pm 0.001(\text{ВТ}),$$

где (ВТ) означает ошибку, связанную с моделированием вклада высших твистов. Для сравнения в настоящем анализе при подгонке с модельно-независимой параметризацией высших твистов было получено значение

$$\alpha_s(M_Z) = (0.1248 \pm 0.0048)(\text{стат.} + \text{сист.}) \pm_{0.0052}^{0.0004} (\text{теор.}),$$

где теоретическая ошибка включает неопределённости, связанные с выбором масштаба перенормировки в эволюционных уравнениях КХД и точки сшивки решений ренормгруппового уравнения для бегущей константы связи при изменении эффективного числа фермионов. Из сравнения этих результатов делается вывод о том, что величина ошибки α_s , приведённая группой CCFR, недооценена. Отмечено, что глюонное распределение, извлечённое из данных CCFR, в малых x существенно жёстче, чем приводимое в работах по анализу данных, полученных в экспериментах на ускорителе HERA, что может свидетельствовать о неточностях данных CCFR в малых x .

В разделе 3.5 описывается глобальный анализ данных ГНР заряженных лептонов на протонной и дейтронной мишенях с целью извлечения партонных распределений и величины α_s с полным учётом корреляций, связанных с систематическими ошибками. В анализе использовались данные групп BCDMS, NMC, ZEUS, H1, FNAL-E-665 и экспериментов на ускорителе SLAC. Исследуется чувствительность результатов подгонки к выбору оценивающей функции и показывается, что при использовании ОФКМ стандартные отклонения многих настраиваемых параметров, включая α_s , в два-три раза меньше, чем при использовании УОФ, а квадрирование статистических и систематических ошибок приводит к статистически значимому смещению центральных значений настраиваемых параметров.

Наряду с экспериментальными ошибками анализируется влияние на результаты подгонки теоретических ошибок, порождаемых неопределённостями массы s -кварка (MC), фактора подавления странного моря (MS), точки сшивки решений ренормгруппового уравнения для бегущей константы связи при изменении эффективного числа фермионов (TS), масштаба перенормировки КХД в эволюционных уравнениях (RS) и модели описания ядерных эффектов в дейтроне (DC). Полученное значение константы сильного взаимодействия равно

$$\alpha_s(M_Z) = (0.1165 \pm 0.0017)(\text{стат.} + \text{сист.}) \pm_{0.0034}^{0.0026} (\text{теор.}),$$

где (теор.) представляет собой комбинацию всех источников теоретических ошибок. Это значение совместимо с величиной $\alpha_s(M_Z) = 0.1184 \pm 0.0031$, взятой из усреднения мировых данных для различных процессов, а его экспериментальная ошибка вдвое меньше, чем в двухпетлевом анализе глобальных данных по ГНР заряженных лептонов, результаты которого приведены в обзоре свойств частиц группы PDG.

Полученные партонные распределения сравниваются с популярными параметризациями групп MRST и п CTEQ. Отмечается статистически значимое превышение распределений, полученных в настоящей работе, над этими параметризациями для u - и d -кварков в области $x \lesssim 0.3$. Это превышение может помочь описать данные по дифференциальному сечению рождения струй в протон-антипротонных столкновениях на ускорителе TEVATRON, где для событий с поперечной энергией в диапазоне $E_T = 200 - 400$ ГэВ также наблюдается избыток по сравнению с предсказаниями КХД, сделанными на основе стандартных партонных распределений, так как в данном диапазоне поперечных энергий существенный вклад в сечение даёт процесс рассеяния кварков на кварках при $x \sim 0.2$.

На основе полученных неопределённостей партонных распределений оцениваются неопределённости партон-партонных светимостей, определяемых соотношением

$$L_{ab}(M) = \frac{1}{s} \int_{\tau}^1 \frac{dx}{x} q_a(x, M^2) q_b(\tau/x, M^2),$$

где s — квадрат энергии столкновений в системе центра масс; M — масса состояния, рождаемого в столкновении; $\tau = M^2/s$; q — партонные распределения; a и b маркируют сорта партонов.

Партон-партонные светимости, необходимые при расчётах сечений “типичных” жёстких процессов при энергии коллайдера ЛНС приведены на рис. 4. Из рисунка видно, что в области $M \lesssim 1$ ТэВ характерные ошибки этих светимостей составляют порядка нескольких процентов; эта точность определяет масштаб отклонений от предсказаний Стандартной Модели, доступных для наблюдения на ЛНС с использованием данного набора партонных распределений.

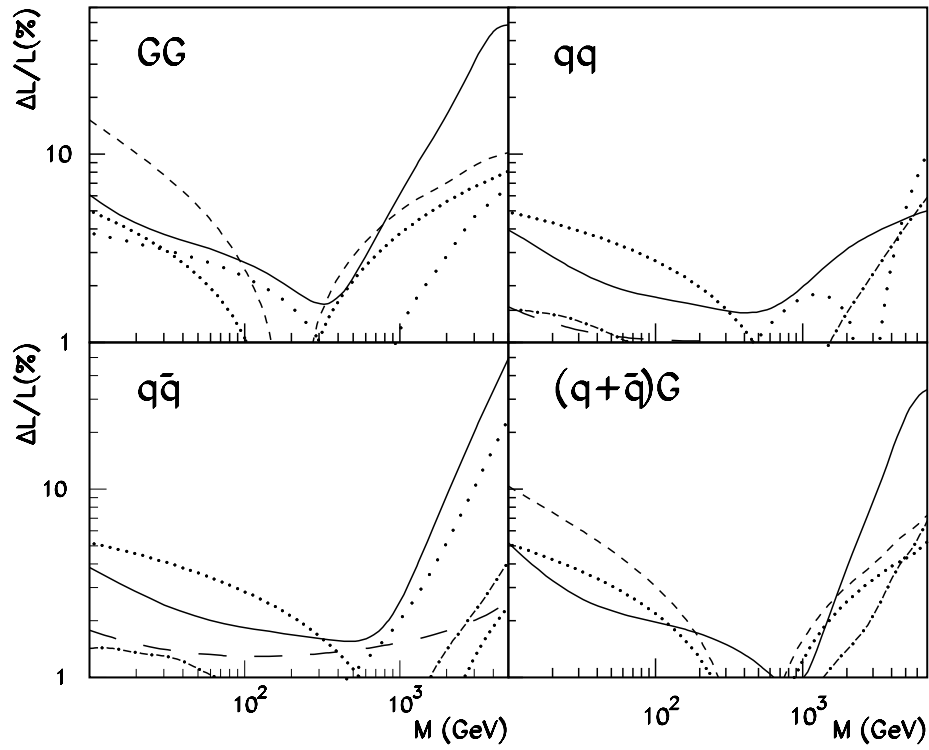


Рис. 4. Относительные ошибки для некоторых партонных светимостей для коллайдера LHC. (сплошные линии — экспериментальные ошибки; короткие штрихи — RS; штрих-пунктир — TS; редкие точки — DC; частые точки — MC; длинные штрихи — SS). Остальные обозначения: $L_{qq} = L_{uu} + L_{dd} + L_{du}$; $L_{q\bar{q}} = L_{u\bar{d}} + L_{d\bar{u}}$; $L_{(q+\bar{q})G} = L_{uG} + L_{\bar{u}G} + L_{dG} + L_{\bar{d}G}$.

Кратко описывается удобный набор программ для использования полученных партонных распределений с учётом их неопределённостей в расчётах по методу Монте-Карло.

В заключении коротко сформулированы основные результаты диссертации:

1. Проанализированы статистические свойства оценивающей функции, использующей для учета систематических ошибок ковариационную матрицу. Показано, что эта оценивающая функция дает состоятельную оценку для реалистичных случаев (т.е. если систематическая ошибка настраиваемого параметра не превышает во много раз статистическую ошибку). Дисперсия этой оценки всегда меньше, чем дисперсия, полученная с помощью упрощенной оценивающей функции, не учитывающей корреляции данных, а смещение пренебрежимо мало для реалистичных случаев, если ковариационная матрица вычисляется при подгонке данных итеративно с использованием текущей оценки настраиваемого параметра.

2. На примере подгонки феноменологической формулы, описывающей поведение структурной функции глубокоэластичного лептон-нуклонного рассеяния F_2 , к прецизионным данным группы NMC проанализирована численная устойчивость многопараметрической минимизации функционалов вида χ^2 в случае сильной корреляции параметров. Показано, что возникающие в этой задаче численные неустойчивости могут быть подавлены применением полуаналитической разностной схемы вычисления производных минимизируемого функционала по настраиваемым параметрам. В частности, для рассмотренного примера применение этой схемы позволяет сэкономить около двух порядков в требуемой точности вычисления теоретической модели.

3. Была проведена модификация программы минимизации MINUIT с целью улучшения её сходимости на основе полуаналитической разностной схемы вычисления производных и организации удобного пользовательского интерфейса для анализа глобальных наборов коррелированных данных.

4. С помощью разработанного программного обеспечения в двухпетлевом приближении КХД был проведён анализ данных по глубокоэластичному рассеянию лептонов на нуклонах и получены следующие физические результаты.

- Величина α_s , извлекаемая из совместного анализа несинглетной части данных для структурной функции F_2 , полученных группой BCDMS и в экспериментах на ускорителе SLAC, чувствительна к процедуре переноса систематических ошибок данных. В анализе с полным учетом корреляций между экспериментальными точками величина $\alpha_s(M_Z)$ составляет $(0.1180 \pm 0.0017)(68\% \text{ C.L.})$. Для сравнения, в более раннем и широко цитируемом анализе с приближённым учётом корреляций систематических ошибок, проделанном другими авторами, было получено значение $\alpha_s(M_Z) = 0.113 \pm 0.003(99\% \text{ C.L.})$.
- Из совместного анализа данных по дифференциальным сечениям групп BCDMS, NMC и экспериментов на ускорителе SLAC получена модельно независимая оценка x -зависимости вклада высших твистов в структурные функции F_2 и F_L при больших x . Показано, что вклад операторов твиста 4, извлекаемый из данных, для структурной функции F_L находится в качественном согласии с предсказаниями модели инфракрасного ренормалона, а для структурной функции F_2 отклоняется от предсказаний и по абсолютной величине и по форме. Вклад операторов твиста 6 в F_L смещен в отрицательные значения, а в F_2 — в положительные, хотя в целом тот и другой совместимы с нулём в пределах экспериментальных ошибок. Вычислены коэффициенты корреляции между вкладом твиста 4 и величиной α_s . Для вклада твиста 4 в F_2 эти коэффициенты оказались порядка -0.9 , Так как корреляция очень велика, это означает, что величины α_s и вклада твиста 4 в F_2 , извлекаемые из анализа этих данных, могут быть сильно чувствительны к различным предположениям, сделанным в ходе анализа. Для вклада твиста 4 в F_L коэффициенты корреляции с α_s существенно меньше, что гарантирует его бóльшую устойчивость.
- Величина α_s , извлечённая из анализа данных группы CCFR, по структурным функциям F_2 и xF_3 составляет $\alpha_s(M_Z) = (0.1248 \pm 0.0048)(\text{эксп.}) \pm_{0.0052}^{0.0004}(\text{теор.})$. Среднее значение и ошибки этой величины больше, чем результат самой группы CCFR,

из-за того, что в нашем анализе вклад высших твистов учтён в модельно-независимой форме. Зависимость вклада твиста 4 в структурные функции F_2 и xF_3 от x согласуется с результатами других модельно-независимых анализов и не противоречит предсказаниям модели инфракрасного ренормалона. Получено указание, что данные CCFR в малых x могут иметь неточности, так как поведение глюонного распределения в малых x , определяемое этими данными $xG(x, 9 \text{ ГэВ}^2) \sim x^{0.092 \pm 0.0073}$, противоречит результатам анализа данных HERA.

- Из совместного анализа данных групп BCDMS, NMC, H1, ZEUS, FNAL-E-665 и экспериментов на ускорителе SLAC получены партонные распределения в нуклоне и их неопределённости, учитывающие статистические и систематические ошибки данных, а также величина $\alpha_s(M_Z) = (0.1165 \pm 0.0017)_{\text{эксп.}} \pm_{0.0034}^{0.0026}_{\text{теор.}}$, которая совместима с величиной, полученной из усреднения мировых данных для разных процессов. На основе этих партонных распределений были сделаны оценки неопределённостей партон-партонных светимостей для ускорителей FNAL и LHC. Благодаря эффективности оценивающей функции, применяемой в анализе, экспериментальная ошибка этих партон-партонных светимостей на ускорителе LHC относительно невелика, несмотря на ограниченность набора данных, использованных в анализе: $\lesssim 10\%$ — для глюон-глюонной светимости при энергиях подпроцесса $M \lesssim 1 \text{ ТэВ}$ и $\lesssim 5\%$ — для кварк-кварковой светимости во всем диапазоне M , доступном для измерений.

Диссертация выполнена в рамках научной программы проекта №96-02-18897, поддерживаемого Российским фондом фундаментальных исследований.

Список литературы

- [1] Alekhin S.I. Statistical Properties of the Estimator Using Covariance Matrix. Preprint IFVE 2000-17 (2000) [hep-ex/0005042].
- [2] Alekhin S.I. Suppression of Numerical Instabilities in Newton Multi-dimensional Minimization of χ^2 Functionals. Preprint IFVE 94-70 (1994).
- [3] Alekhin S.I. Value of α_s from the Analysis of the SLAC-BCDMS Deep Inelastic Scattering Data. // Phys. Rev. **D59**, 114016 (1999) [hep-ph/9809544].
- [4] Alekhin S.I. High Twist Contribution to the Longitudinal Structure Function F_L at High x . // Eur. Phys. J. **C12**, 587 (2000) [hep-ph/9902241].
- [5] Alekhin S.I. and Kataev A.L. The NLO DGLAP Extraction of α_s and Higher Twist Terms from CCFR xF_3 and F_2 Structure Functions Data for νN DIS. // Phys. Lett. **B452**, 402 (1999) [hep-ph/9812348].
- [6] Alekhin S.I. and Kataev A.L. The NLO DGLAP Extraction of α_s and Higher Twist Terms from CCFR xF_3 and F_2 Structure Functions Data for νN DIS: Results and Scale Dependence. // Nucl. Phys. **A666-667**, 179 (2000) [hep-ph/9908349].
- [7] Alekhin S.I. Extraction of Parton Distributions and α_s from DIS Data within the Bayesian Treatment of Systematic Errors. // Eur. Phys. J. **C10** (1999) 395 [hep-ph/9611213].
- [8] Алёхин С.И. Анализ данных по глубоконеупругому рассеянию: партонные распределения, α_s и высшие твисты. Препринт ИФВЭ 2000-39 (2000), [hep-ex/0011002], принято в Physical Review D.

Рукопись поступила 5 января 2001 г.

С.И. Алёхин.

Развитие метода учета корреляций систематических ошибок в анализе данных по глубоконеупругому рассеянию лептонов.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы \LaTeX .

Редактор Н.В.Ежела.

Технический редактор Н.В.Орлова.

Подписано к печати 9.01.2001. Формат $60 \times 84/16$. Офсетная печать.
Печ.л. 1,23. Уч.-изд.л. 0,47. Тираж 100. Заказ 5. Индекс 3649.
ЛР №020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т 2001-1, И Ф В Э, 2001
