



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2-2001-208

На правах рукописи
УДК 539.12.017; 539.128.2

СИДОРОВ
Александр Викторович

**АНАЛИЗ СТРУКТУРНЫХ ФУНКЦИЙ g_1 И F_3
В ВЫСШИХ ПОРЯДКАХ ТЕОРИИ ВОЗМУЩЕНИЙ КХД**

Специальность: 01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Дубна 2001

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук	Н.В. Красников
член-корреспондент РАН	Л.Н. Липатов
член-корреспондент РАН	В.Ф. Образцов

Ведущая организация:

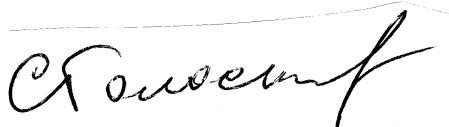
Научно-исследовательский институт ядерной физики
Московского государственного университета, г. Москва

Защита диссертации состоится “___” _____ 2001 г. на заседании диссертационного совета Д047.01.01 в Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Объединенного института ядерных исследований

Автореферат разослан “___” _____ 2001 г.

Ученый секретарь совета
доктор физико-математических наук



С.В. Голоскоков

Актуальность темы

Глубоконеупругое лептон-нуклонное рассеяние (ГНР) относится к классическим и постоянно измеряемым процессам современной физики элементарных частиц. На особую роль ГНР нейтрино для изучения структуры нуклона указывал М.А. Марков. Фундаментальная концепция о скейлинге структурных функции (СФ), измеряемых в процессе ГНР, легла в основу многих последующих исследований. После экспериментального подтверждения скейлинга и указаний на точечный характер составляющих нуклона в работах Н.Н.Боголюбова, В.С.Владимирова и А.Н.Тавхелидзе был развит метод, позволяющий анализировать формфакторы адронного тензора, определяющего сечение ГНР, на основе интегрального представления Йоста-Лемана-Дайсона и объясняющий скейлинговое (или "автомодельное") поведение структурных функций, исходя из общих принципов локальной квантовой теории поля. Теперь мы знаем, что свойство "автомодельности" верно лишь в асимптотическом пределе, а его нарушение количественно описывается квантовой хромодинамикой (КХД). Нарушение скейлинга носит логарифмический характер для операторов лидирующего твиста, однако в области малых Q^2 вклад высших твистов ($\sim 1/Q^2$) может оказаться значительным. Важной задачей физики элементарных частиц является детальная проверка предсказаний квантовой хромодинамики как фундаментальной теории сильных взаимодействий. Диссертация посвящена сравнению предсказаний квантовой хромодинамики для нарушения скейлинга структурных функций с данными эксперимента с учетом высших поправок теории возмущений, поправок на массу мишени, ядерных эффектов, схемной зависимости предсказаний теории возмущений и вклада следующего за лидирующим твиста. Анализ основывался на использовании методов ренормгруппы Н.Н.Боголюбова и Д.В.Ширкова и процедуре восстановления СФ ГНР по ее меллиновским моментам с применением разложения СФ в ряд по полиномам Якоби.

Характеристиками, традиционно извлекаемыми из сечений ГНР нейтрино на нуклоне, являются структурные функции F_2 и xF_3 , а в случае рассеяния поляризованных пучков заряженных лептонов измеряются СФ g_1 и соответствующая ей асимметрия A_1 .

Измерение структурных функций нуклона в поляризованном, глубоконеупругом рассеянии лептонов позволяет проверить основные предсказания квантовой хромодинамики на малых расстояниях $Q^2 \gg M_p^2$ и определить поведение кварковых и глюонных распределений. Структура адронного тензора $W_{\mu\nu}$, описывающего эти процессы, обычно записывают в форме разложения на световом фронте, которое при нулевых массах кварков для интересующих нас членов имеет следующий схе-

матический вид:

$$\begin{aligned}
 W_{\mu\nu} \sim & \left(-g_{\mu\nu} + \frac{q_\mu q_\nu}{q^2} \right) F_1(x, Q^2) + \frac{\hat{P}_\mu \hat{P}_\nu}{P \cdot q} F_2(x, Q^2) - i\varepsilon_{\mu\nu\lambda\sigma} \frac{q^\lambda P^\sigma}{2P \cdot q} F_3(x, Q^2) \\
 & + i\varepsilon_{\mu\nu\lambda\sigma} \frac{q^\lambda S^\sigma}{P \cdot q} g_1(x, Q^2) + \dots,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где

$$\hat{P}_\mu = P_\mu - \frac{P \cdot q}{q^2} q_\mu, \quad \hat{S}_\mu = S_\mu - \frac{S \cdot q}{q^2} q_\mu.$$

Здесь через P, q и S обозначены четырехвекторы импульса нуклона, переданного импульса и спина нуклона. Неполаризованные СФ обозначены $F_i(x, Q^2)$, а поляризованные $g_i(x, Q^2)$. В сечении неполяризованного рассеяния нейтрино и антинейтрино дают вклад СФ F_1, F_2 и F_3 . Изучению свойств СФ F_3 будут посвящены Главы 1 - 3. В процессе глубоконеупругого рассеяния продольно поляризованных электронов и мюонов на продольно поляризованных нуклонах мишени извлекается информация о структурной функции g_1 . Рассмотрению свойств этой СФ посвящены Главы 4 и 5.

Отметим, что если константа сильной связи в КХД и коэффициентные функции для СФ F_2 и F_3 рассчитаны в настоящее время вплоть до четвертого порядка теории возмущений, то другой важнейший компонент, аномальные размерности, известны для моментов СФ F_3 в третьем, а для g_1 только во втором порядке. Именно в этих, высших известных порядках, проведен КХД анализ экспериментальных данных для СФ F_3 и g_1 .

В рамках пертурбативного подхода КХД предсказывает логарифмическое по Q^2 нарушение скейлинга СФ. Степенные поправки порядка Q^{-2} возникают вследствие учета конечной массы мишени и непертурбативных эффектов. Если первые имеют характерный масштаб порядка квадрата массы нуклона, то вторые - порядка $\Lambda_{\text{КХД}}^2$. Ситуация осложняется тем, что конкретный анализ экспериментальных данных проводится в первом, втором или третьем порядках, и отброшенный остаток бесконечного ряда теории возмущений, эффективно суммируясь, может дать дополнительный степенной вклад порядка $\exp[-1/\alpha_S(Q^2)] \sim 1/Q^2$, затеяющий вклад твиста-4. Учитывая, что дополнительные степенные поправки могут возникать при учете ядерных эффектов а также имеющиеся теоретические оценки в рамках приближения инфракрасного ренормалона, становится понятным интерес, проявляемый к изучению степенных поправок и извлечению формы их зависимости от бьеркеновской переменной x . Функция F_3 является удобным объектом изучения нарушения скейлинга в силу упрощений, связанных с отсутствием вклада морских кварков и глюонов, и наличию недавний экспериментальных данных коллаборации CCFR

(Фермилаб). Поэтому степенные поправки именно к этой СФ стали объектом изучения в Главе 1.

Вклад высших порядков теории возмущений КХД и твиста-4 в эволюцию СФ наиболее существенен в области малых Q^2 . Этим объясняется интерес к изучению СФ xF_3 и F_2 в области Q^2 меньших, чем у коллаборации ССFR. Такие данные удалось получить на установке "Нейтринный детектор" коллаборации ОИЯИ (Дубна) – ИФВЭ (Протвино). Их анализу посвящена Глава 2. Важным преимуществом данных "Нейтринного детектора" является низкий атомный вес ядер мишени, не превышающий атомного веса алюминия. Это значительно меньше атомного веса железа, составляющего мишень коллаборации ССFR. Таким образом, ядерные эффекты в данных ОИЯИ–ИФВЭ несколько подавлены по сравнению с данными ССFR.

Появление точных данных ССFR и развитие более совершенных методов КХД-анализа СФ ставит вопрос об учете ядерных эффектов. Этот эффект для СФ xF_3 был рассчитан на основе релятивистской модели дейтрона, а в случае железной мишени использовался подход с модельной спектральной функцией нуклона в ядре.

Получены ограничения, налагаемые данными ССFR на применимость модели сильного взаимодействия с "фиксированной точкой", которые лишней раз указывают на предпочтительность асимптотически свободной КХД.

Измерение поляризованных партонных распределений, отражающих внутреннюю спиновую структуру нуклона, требуют постановки более сложных экспериментов нежели в неполяризованном случае. Действительно, приходится измерять небольшие асимметрии при небольшом числе регистрируемых событий, а эксперименты по рассеянию нейтрино на поляризованных мишенях в настоящее время недоступны. Тем не менее, в основном вследствие неожиданных результатов, полученных Европейской мюонной коллаборацией в 1987 году и приводящих в наивной партонной модели к так называемому "спиновому кризису в партонной модели", экспериментаторы приложили огромные усилия для определения формы поляризованных партонных распределений из глубоконеупругого рассеяния лептонов. Знание поляризованных распределений важно для многих других направлений физики высоких энергий, например, для исследовательских программ на коллайдерах Брукхейвенской национальной лаборатории, ДЭЗИ в Гамбурге и эксперимента COMPASS в Женеве. Сказанное выше определяет важность и необходимость проведения анализа мировых экспериментальных данных во втором порядке теории возмущений КХД. Проверка самосогласованности и надежности такого анализа достигается применением различных схем факторизации. Анализ проводился в схемах \overline{MS} , Адлера-Бардина (АБ) и JET.

Замечательное свойство JET схемы, предложенной в работах Карлитца, Коллинза, Мёллера, Ефремова, Теряева и др., состоит в том, что первые моменты $\Delta\Sigma$

и $(\Delta s + \Delta \bar{s})$ не зависят от Q^2 , а вклад жестких процессов наиболее полно аккумулялирован в коэффициентных функциях Вилсона для СФ. Поэтому в JET схеме можно интерпретировать $\Delta \Sigma$ как вклад спинов кварков в спин нуклона и обоснованно сравнивать эту величину, полученную из экспериментов по глубоконеупругому рассеянию, с предсказаниями различных нетеоретико-возмущенческих (составных, киральных и др.) кварковых моделей для малых Q^2 . Правила пересчета для первых моментов синглетной комбинации кварковых плотностей и странного моря из схемы $\overline{\text{MS}}$ в схему JET имеют вид:

$$\Delta \Sigma_{\text{JET}} = \Delta \Sigma_{\overline{\text{MS}}}(Q^2) + N_f \frac{\alpha_s(Q^2)}{2\pi} \Delta G(Q^2), \quad (2)$$

$$(\Delta s + \Delta \bar{s})_{\text{JET}} = (\Delta s + \Delta \bar{s})_{\overline{\text{MS}}}(Q^2) + \frac{\alpha_s(Q^2)}{2\pi} \Delta G(Q^2). \quad (3)$$

Следует подчеркнуть, что второе слагаемое в правой части равенств (2) и (3) может оказаться большим в силу вклада аксиальной аномалии $\Delta G(Q^2) \sim 1/\alpha_s(Q^2)$, и привести к значительной разности значений $\Delta \Sigma$ и $(\Delta s + \Delta \bar{s})$, полученных в $\overline{\text{MS}}$ и JET схемах. Формулы (2) и (3) справедливы и для перехода в схему AB.

Невысокая точность поляризованных данных делает весьма привлекательной возможность введения единой параметризации для поляризованных и неполяризованных партонных распределений и на этой основе проведение совместного анализа как поляризованных, так и неполяризованных структурных функций. Методы, развитые в Главах 1 и 4, и параметризация, построенная на основе модели Бродского - Букхарда - Шмидта для фиксированного значения Q^2 , позволяют осуществить совместный фит данных во втором порядке КХД.

Цель работы состояла в том, чтобы, используя метод решения эволюционного уравнения Гривова - Липатова - Альгарелли - Париза - Докшицера для СФ, основанный на разложении его решений по полиномам Якоби, провести детальный анализ экспериментальных данных по СФ F_3 в третьем порядке и g_1 во втором порядке теории возмущений КХД. Конкретно эта цель выразилась в постановке следующих задач:

1. В ходе анализа СФ F_3 :

- определить значение константы сильного взаимодействия и x -зависимость вклада следующего за лидирующим твиста (твиста-4) в трех первых порядках теории возмущений КХД;
- для указанных выше величин оценить неопределенности, связанные с учетом четвертого порядка теории возмущения, вкладом ядерных эффектов, выбором точки отсчета Q_0^2 и вида весовой функции полиномов Якоби;

- рассмотреть Q^2 -зависимость правила сумм Гросса-Ллевеллина Смита и параметров, определяющих форму СФ F_3 в третьем порядке теории возмущений;
 - наложить ограничения на применимость модели сильной связи с "фиксированной точкой".
2. Провести анализ данных для СФ нуклона полученных на установке "Нейтринный детектор" коллаборации ОИЯИ (Дубна) – ИФВЭ (Протвино).
 3. В ходе анализа СФ g_1 :
 - провести анализ "мировых" экспериментальных данных с использованием различных схем факторизации;
 - определить вид поляризованных партонных распределений с учетом ко-ридора ошибок и их связь с низкоэнергетическими свойствами гиперонов;
 - оценить вклад степенных эффектов в асимметрию A_1 .
 4. Во втором порядке теории возмущений КХД осуществить совместный анализ экспериментальных данных по инклюзивному поляризованному и неполяризованному глубоконеупругому рассеянию лептонов.

Научная новизна и практическая ценность результатов работы, полученных автором.

Впервые в третьем порядке теории возмущений проведен КХД-анализ данных коллаборации CCFR (Фермилаб) для СФ xF_3 и определено значение константы связи $\alpha_s(M_Z)$.

Для СФ F_3 в первом, втором и третьем порядках теории возмущений определена x -зависимость вклада твиста-4. Сравнение этих результатов между собой позволило выявить эффект зависимости твистового вклада от порядка теории возмущений, учитываемого при анализе.

Изучен экспериментальный статус предсказаний ренормальной модели для степенного вклада в структурную функцию F_3 . Во втором порядке теории возмущений выявлено качественное согласие ренормальных предсказаний с извлеченной автором x -зависимостью степенных поправок и обнаружен эффект подавления ренормального степенного вклада в F_3 с ростом порядка теории возмущений.

Метод аппроксимантов Паде был впервые применен к анализу вклада аномальных размерностей в асимптотический ряд теории возмущений для моментов структурной функции F_3 . Развитая процедура позволила в полной мере учесть недавно вычисленный вклад четвертого порядка теории возмущений для константы α_s и ко-эффициентных функций СФ F_3 , использовать условия сшивки на порогах тяжелых

кварков и точнее оценить теоретические неопределенности в значениях константы связи и в форме степенных поправок.

Впервые в рамках релятивистской ковариантной модели дейтрона в переменных светового фронта получено отношение $R_F^{D/N} = F_3^D / F_3^N$, описывающее вклад ядерных эффектов в F_3 . Их оценка снизу сделана в дейтронном приближении на световом фронте.

Впервые в первом, втором и третьем порядках теории возмущений был проведен КХД-анализ данных по СФ $x F_3$ целого ряда коллабораций отличных от CCFR. Полученная при этом x -зависимость твиста-4 была использована коллаборацией CCFR в ее собственном анализе данных.

Работы, вошедшие в диссертацию, инициировали извлечение экспериментальных значений структурных функций $x F_3$ и F_2 на основе набранной статистики для сечений нейтринного и антинейтринного глубоконеупругого рассеяния на "Нейтринном детекторе" коллаборации ОИЯИ-ИФВЭ в области малых переданных импульсов. Анализ полученных данных по СФ $x F_3$ в этой, недоступной другим экспериментам кинематической области, привел к высокому значению константы связи, согласующемуся со среднемировым значением $\alpha_S(M_Z) \sim 0.118$ в пределах ошибок.

Развитый в диссертации метод восстановления структурной функции $x F_3$ с использованием разложения по полиномам Якоби (1996) в течение нескольких лет оставался единственным, позволяющим учитывать вклады третьего и четвертого порядка теории возмущений в КХД и извлекать x -зависимость твиста-4.

Метод полиномов Якоби впервые применен для КХД-анализа мировых данных по СФ g_1 в различных схемах факторизации. Впервые были обработаны данные с бинингом по обоим кинематическим переменным: x и Q^2 . Если анализ в \overline{MS} и AB уже проводился ранее на основе численного решения эволюционного уравнения, то использование JET-схемы явилось новым шагом, показавшим, что AB и JET-схемы позволяют точнее, чем в \overline{MS} , определить поляризованное распределение глюонов.

Путем анализа мировых экспериментальных данных показано, что принципиально невозможно извлечь поляризованное распределение легких морских кварков из данных по чисто инклюзивному поляризованному глубоконеупругому рассеянию. Это является весомым аргументом в пользу постановки экспериментов по измерению полунклюзивного глубоконеупругого рассеяния. Удачный выбор параметризации партонных распределений, содержащий небольшое число фитируемых параметров, позволяет вычислить ошибки как самих партонных распределений, так и различных физических величин, выражающихся через них.

Совместный КХД-анализ поляризованных и неполяризованных данных по СФ ГНР является одной из еще не решенных феноменологических задач физики высоких энергий. Первым шагом в этом направлении явился совместный фит поля-

ризованных и неполяризованных данных ГНР с использованием модели Бродского-Буркхарда-Шмидта, в рамках которой параметризуются непосредственно величины распределений кварков $q(x, Q^2)_\pm$ и глюонов $G(x, Q^2)_\pm$, чьи спиральности направлены вдоль или против спиральности нуклона мишени. Этот позволит самосогласованно описать огромный экспериментальный материал по ГНР лептонов и точнее определять партонные распределения.

Полученные в диссертации поляризованные партонные распределения были использованы, например, в работе Больионе и Лидера для расчета асимметрии рождения пионов в pp-столкновениях, в работе Франкфурта с соавторами для расчета жесткого эксклюзивного электророждения декуплета барионов. Согласно базе данных SLAC наиболее цитируемыми в настоящее время работами, вошедшими в диссертацию, являются: [17] - 65 ссылки; [21] - 53 ссылки; [1] - 49 ссылок; [10] - 49 ссылок; [30] - 41 ссылка. Результаты цитируются в Review of Particle Physics (Particle Data Group) за 1998 и 2000 годы.

На защиту выдвигаются следующие результаты:

1. Впервые проведен КХД-анализ экспериментальных данных по СФ $x F_3$ в третьем порядке теории возмущений. На этой основе предложена параметризация распределения валентных кварков как функции двух переменных x и Q^2 . Дана оценка вклада ядерных эффектов в правило сумм Гросса-Ллелллина Смита и СФ F_3 .
2. Для СФ $x F_3$ в первом, втором и третьем порядках теории возмущений определена x -зависимость вклада твиста-4. Показано, что величина этого вклада зависит от порядка теории возмущений. Степенной вклад, вычисленный в рамках модели инфракрасного ренормалона, уменьшается с ростом порядка теории возмущений.
3. Дана оценка неопределенностей, обусловленных членами четвертого порядка теории возмущений на основе применения метода Падэ- аппроксимантов к трехпетлевым выражениям для аномальных размерностей и коэффициентным функциям. Показано, что в третьем порядке теории возмущений уменьшаются неопределенности константы связи и x -зависимости вклада твиста-4, связанные с выбором масштаба факторизации и перенормировки.
4. Путем сравнения с экспериментальными данными по $x F_3$ наложены ограничения на модель сильной связи с "фиксированной точкой".

5. Проведен КХД анализ данных по СФ F_2 и xF_3 в области малых Q^2 коллаборации "Нейтринный детектор" ИФВЭ-ОИЯИ. Получено значение константы сильного взаимодействия, согласующееся с результатами коллабораций CCFR и LEP.
6. Развита метод КХД-анализа СФ g_1 , основанный на разложении ее в ряд по полиномам Якоби. Проведен фит мировых экспериментальных данных по СФ g_1 в различных схемах факторизации. Поляризованные партонные распределения определены с учетом "коридоров" ошибок. Показано, что JET-схема, также как и AB , позволяет точнее определить форму распределения глюонов.
7. Показано, что для существующего набора экспериментальных данных величина степенного вклада в фотон-нуклонную спиновую асимметрию $A_1(x, Q^2)$ сравнима с нулем для экспериментально доступных значений x .
8. Исследована чувствительность продольных партонных распределений к отклонению значения несинглетного аксиального заряда от его $SU(3)$ симметричного значения. Показано, что хотя поляризация странных кварков и глюонов существенно зависит от нарушения $SU(3)$ симметрии, сумма поляризаций кварков в нуклоне $\Delta\Sigma$ практически не зависит от этого нарушения.
9. На основе параметризации Бродского и др. впервые проведено совместное описание данных по поляризованным и неполяризованным СФ в случае нарушения скейлинга во втором порядке теории возмущений КХД.

Краткое содержание диссертации

Во **введении** обоснована актуальность проблемы, сформулированы цель работы и ее основные результаты.

В **первой Главе** изложены результаты систематического анализа экспериментальных данных по несинглетной СФ xF_3 методом, основанным на разложении СФ в ряд по полиномам Якоби. Для этого используются как наиболее точные на сегодня данные коллаборации CCFR, так и набор менее точных данных ряда коллабораций, отличных от CCFR. Анализ проводился в первом, втором и третьем порядках теории возмущений КХД. Метод полиномов Якоби рассматривается как частный случай более общего подхода, основанного на квадратурных формулах Гаусовского типа, что позволяет более эффективно выбирать весовые функции полиномов.

Меллиновские моменты для несинглетной СФ $xF_3(x, Q^2)$ определяются следующим образом:

$$M_n^{NS}(Q^2) = \int_0^1 x^{n-1} F_3(x, Q^2) dx \quad (4)$$

где $n = 2, 3, 4, \dots$. Решение ренормгруппового уравнения для них может быть представлено в следующей форме

$$\frac{M_n^{NS}(Q^2)}{M_n^{NS}(Q_0^2)} = \exp \left[- \int_{A_s(Q_0^2)}^{A_s(Q^2)} \frac{\gamma_{NS}^{(n)}(x)}{\beta(x)} dx \right] \frac{C_{NS}^{(n)}(A_s(Q^2))}{C_{NS}^{(n)}(A_s(Q_0^2))} \quad (5)$$

здесь $M_n^{NS}(Q_0^2)$ - феноменологические константы, связанные с выбором шкалы факторизации. При фиксированном квадрате переданного импульса Q_0^2 используется параметризация:

$$M_n^{NS}(Q_0^2) = \int_0^1 x^{n-2} A(Q_0^2) x^{b(Q_0^2)} (1-x)^{c(Q_0^2)} (1 + \gamma(Q_0^2)x) dx \quad (6)$$

где $\gamma \neq 0$ или $\gamma = 0$.

В четвертом порядке теории возмущений выражение для коэффициентной функции $C_{NS}^{(n)}$ можно записать в виде:

$$C_{NS}^{(n)}(A_s) = 1 + C^{(1)}(n)A_s + C^{(2)}(n)A_s^2 + C^{(3)}(n)A_s^3, \quad (7)$$

а член, соответствующий аномальным размерностям, имеет вид:

$$\exp \left[- \int^{A_s(Q^2)} \frac{\gamma_{NS}^{(n)}(x)}{\beta(x)} dx \right] = (A_s(Q^2))^{\gamma_{NS}^{(0)}(n)/2\beta_0} \times AD(n, A_s) \quad (8)$$

где

$$AD(n, A_s) = [1 + p(n)A_s(Q^2) + q(n)A_s(Q^2)^2 + r(n)A_s(Q^2)^3] \quad (9)$$

а $p(n)$, $q(n)$ и $r(n)$ - известные функции коэффициентов β_0 , β_1 , β_2 , β_3 и $\gamma_{NS}^{(0)}(n)$, $\gamma_{NS}^{(1)}(n)$, $\gamma_{NS}^{(2)}(n)$ и $\gamma_{NS}^{(3)}(n)$, задающих разложение ренормгрупповой β -функции и аномальных размерностей $\gamma_{NS}^{(n)}(A_s)$ в ряд по степеням A_s . Константа сильного взаимодействия $A_s = \alpha_s/(4\pi)$ записывается в виде ряда по обратным степеням $\ln(Q^2/\Lambda_{MS}^2)$.

Восстанавливаемая СФ для каждой пары кинематических переменных x , Q^2 выражается через значения ее мелиниовских моментов:

$$xF_3^{Nmax}(x, Q^2) = w(\alpha, \beta)(x) \sum_{n=0}^{Nmax} \Theta_n^{\alpha, \beta}(x) \sum_{j=0}^n c_j^{(n)}(\alpha, \beta) M_{j+2, xF_3}(Q^2) + \frac{h(x)}{Q^2} \quad (10)$$

где $\Theta_n^{\alpha, \beta}(x)$ полиномы Якоби, а коэффициенты $c_j^{(n)}(\alpha, \beta)$ задают их разложение по степеням x . Параметры α, β задают вид весовой функции полиномов Якобм $w(\alpha, \beta) = x^\alpha(1-x)^\beta$ и фиксируются из условия наискорейшего восстановления исследуемой СФ. Член $h(x)/Q^2$ описывает вклад твиста-4. Отметим, что в третьем порядке теории возмущений для СФ F_3 аномальные размерности $\gamma_{NS}^{(2)}(n)$ и коэффициентные функции $C^{(2)}(n)$ вычисленна лишь для первых 7 нечетных моментов. Подход, основанный на вырвжении (10), позволяет эффективно использовать эту ограниченую

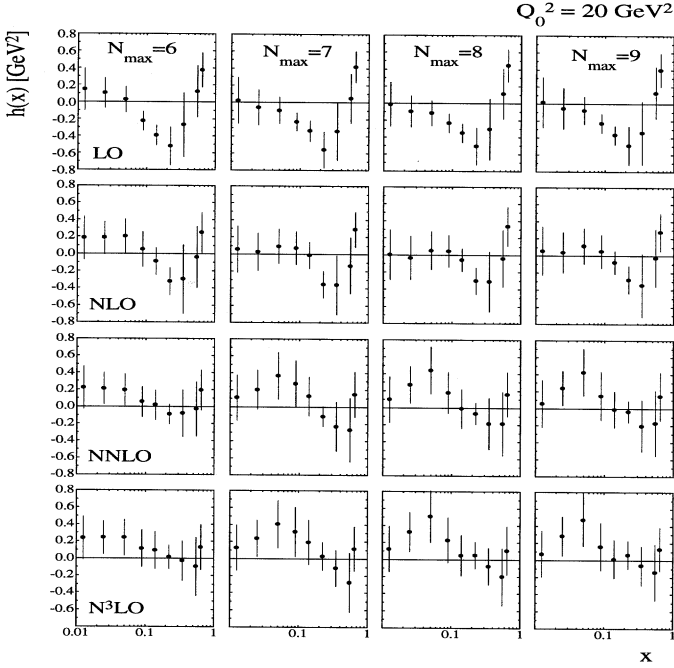


Рис. 1: Форма x -зависимости вклада $h(x)/Q^2$ полученная из анализа данных коллаборации CCFR'97 в различных порядках ТВ при $Q_0^2 = 20 \text{ ГэВ}^2$ для различных значений N_{max} .

информацию. В ходе анализа в высших порядках теории возмущений извлекается значение константы сильного взаимодействия $\alpha_s(M_Z)$ с учетом и без учета вклада твиста-4. Приведем значения (11) полученные в случае $h(x)$, вычисленной в рамках модели инфракрасного ренормалона:

$$\begin{aligned}
 \alpha_s(M_Z) \text{ (NLO)} &= 0.120 \pm 0.002 \text{ (стат.)} \pm 0.005 \text{ (сист.)} \begin{matrix} +0.010 \\ -0.006 \end{matrix} \text{ (теор.)} \\
 \alpha_s(M_Z) \text{ (NNLO)} &= 0.119 \pm 0.002 \text{ (стат.)} \pm 0.005 \text{ (сист.)} \begin{matrix} +0.004 \\ -0.002 \end{matrix} \text{ (теор.)} \\
 \alpha_s(M_Z) \text{ (N}^3\text{LO)} &= 0.119 \pm 0.002 \text{ (стат.)} \pm 0.005 \text{ (сист.)} \begin{matrix} +0.002 \\ -0.001 \end{matrix} \text{ (теор.)}
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Результаты модельнонезависимого определяется x -зависимость вклада твиста-

4 представлены на рис.1. Выявлен эффект изменения твистового вклада с ростом порядка теории возмущений, включенного в КХД-анализ (рис.1).

На основе применения аппроксимантов Паде к выражениям как для моментов структурных функций, так и непосредственно к разложениям аномальных размерностей и коэффициентных функций, оцениваются неопределенности, связанные с учетом вклада членов четвертого порядка теории возмущений. Показано, что теоретические неопределенности константы сильного взаимодействия (11) и вклада твиста-4, связанные с выбором масштаба факторизации и перенормировки, уменьшаются в высших порядках теории возмущений КХД. Рассматривается вопрос об устойчивости результатов относительно выбора параметров весовой функции полиномов Якоби и точки отсчета Q_0^2 .

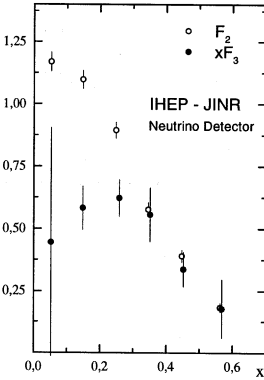


Рис. 2: СФ F_2 — [o] и xF_3 — [•]. Статистические и систематические ошибки добавлены в квадратурах.

ошибок результаты самой коллаборации CCFR и представленные в Главе 1 результаты обработке данных в области значительно более высоких Q^2 .

В третьей Главе в рамках релятивистской модели дейтрона в переменных светового фронта вычисляется величина F_3^D/F_3^N . Ядерный эффект в СФ xF_3 на железной мишени вычисляется с использованием модельной спектральной функции нуклона, учитывающей одно- и двухнуклонные возбуждения. В ходе КХД-анализа в третьем порядке теории возмущений определяется Q^2 -зависимость параметров,

Во второй Главе на основе анализа данных, полученных при экспозиции "Нейтринного детектора" ИФВЭ-ОИЯИ с широкой пролетной базой нейтринного и антинейтринного пучков на ускорителе У-70 в Серпухове, структурные функции F_2 и xF_3 (рис.2) извлекаются в кинематической области малых Q^2 ($0.55 \text{ ГэВ}^2 < Q^2 < 4.0 \text{ ГэВ}^2$), не исследованной коллаборацией CCFR. В ходе КХД-анализа этих данных для учета вклада твиста-4, необходимого в области малых Q^2 , применяются результаты модельнезависимого извлечения x -зависимости твиста-4, полученные в Главе 1. Полученные значения константы сильного взаимодействия $\alpha_s(M_Z) = 0.123_{-0.013}^{+0.010}$ и масштабного параметра $\Lambda_{\overline{MS}} = (411 \pm 200) \text{ МэВ}$ подтверждают в пределах

определяющих форму СФ xF_3 и дается оценка снизу вклада ядерных эффектов в правило сумм Гросса-Ллевеллина Смита. На этой основе строится параметризация СФ xF_3 как функции двух кинематических переменных с учетом модельнонезависимого вклада твиста-4.

Анализируется применимость дейтронной модели для изучения поведения СФ дейтрона в области $x_D > 1$. Проводится КХД-анализ смоделированных данных, результаты которого показывают, что Q^2 -зависимости СФ дейтрона при $x_D > 1$ согласуются с хромодинамическими ожиданиями.

Путем сравнения с экспериментальными данными по xF_3 накладываются ограничения на модель сильной связи с "фиксированной точкой", интересной особенностью которой является степенное нарушение скейлинга.

В четвертой Главе метод, основанный на разложении структурной функции по полиномам Якоби, обобщается на случай СФ g_1 . На этой основе во втором порядке теории возмущений проводится КХД-анализ мировых экспериментальных данных по инклюзивному глубоконеупругому рассеянию поляризованных лептонов. Изучается роль различных дополнительных гипотез о флэйворном составе поляризованных морских кварков $\Delta\bar{u} = \Delta\bar{d} = \lambda\Delta\bar{s}$ и об отношении несинглетных распределений $\Delta q_3(x)/\Delta q_8(x)$ при КХД-анализе. Извлекаются поляризованные распределения партонов с учетом коридоров ошибок. Особое внимание обращается на анализ данных, содержащих детальный бининг по обоим кинематическим переменным в плоскости (x, Q^2) .

Исследована чувствительность продольных партонных распределений к отклонению значения несинглетного аксиального заряда a_8 от его SU(3) симметричного значения $a_8 = 0.58$. Показано, что поляризация u и d кварков, как и сумма поляризаций кварков, т.е. часть спина нуклона, которая несетя кварками $\Delta\Sigma$, практически не зависят от нарушения SU(3) симметрии β -распадов гиперонов, а поляризация странных кварков и глюонов в нуклоне сильно зависят от этого нарушения. На рис.3 показана x-зависимость этих распределений. Из анализа данных дается модельнонезависимая оценка степенных $\sim 1/Q^2$ вкладов в асимметрию A_1 для протона, дейтрона и нейтрона, которая оказывается совместимой с нулем.

Для проверки самосогласованности результатов анализа он проводится в трех различных схемах факторизации \overline{MS} , AB и JET. Путем сравнения этих результатов делается оценка вклада членов третьего порядка теории возмущений. Результат нашего анализа "мировых" данных для $(\Delta s + \Delta\bar{s})$ при $Q^2 = 1 \text{ GeV}^2$ в \overline{MS} и JET схемах ($\Delta G = 0.57$): $(\Delta s + \Delta\bar{s})_{\overline{MS}} = -0.10 \pm 0.01$ и $(\Delta s + \Delta\bar{s})_{\text{JET}} = -0.06 \pm 0.01$. демонстрирует сильную схемную зависимость первого момента распределения поляризованных странных кварков.

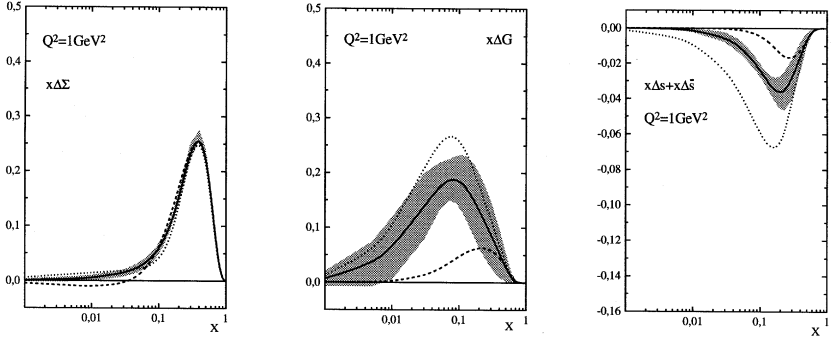


Рис. 3: Поляризованные распределения $\Delta\Sigma$, ΔG и Δs при $Q^2 = 1 \text{ GeV}^2$ в JET схеме. Сплошная, точечная и пунктирная линии соответствуют $SU(3)$ симметричному случаю $a_8 = 0.58$ ($SU(3)$), 0.86 и 0.40. Серые "коридоры" соответствуют экспериментальным ошибкам.

В пятой Главе развивается метод совместного КХД анализа поляризованных и неполяризованных структурных функций. Для описания распределений при фиксированном значении Q^2 используется модель, предложенная Бродским, Буркхардом и Шмидтом, в которой параметризуются непосредственно величины распределений кварков $q(x, Q^2)_\pm$ и глюонов $G(x, Q^2)_\pm$, чьи спиральности направлены вдоль или против спиральности нуклона мишени. Через них легко выражаются как обычные неполяризованные плотности ($q(x, Q^2) = q_+(x, Q^2) + q_-(x, Q^2)$, $G(x, Q^2) = G_+(x, Q^2) + G_-(x, Q^2)$), так и поляризованные партонные распределения ($\Delta q(x, Q^2) = q_+(x, Q^2) - q_-(x, Q^2)$, $\Delta G(x, Q^2) = G_+(x, Q^2) - G_-(x, Q^2)$).

Свободные параметры и форма поляризованных и неполяризованных партонных распределений определяются из совместного фита поляризованных и неполяризованных данных во втором порядке КХД. Позитивность при этом выполняется автоматически, а правила кваркового счета точно соблюдаются в исходной точке ренормгрупповой эволюции Q_0^2 .

В заключении дана сводка основных результатов, полученных в диссертации.

Апробация работы.

Результаты, изложенные в диссертации, докладывались на семинарах Лаборатории теоретической физики ОИЯИ, НИИЯФ МГУ, ИФВЭ, университетов городов Пиза, Бари, Тренто, Турина, Бохума, Дортмунда и Дели, а также на:

- Международном симпозиуме "Взаимодействия адронов - теория и феноменология", Бехинэ, 1988;

- Весеннем симпозиуме по физике высоких энергий, Кордобан, 1989;
 - Международных семинарах "Структура адрона 91, 92, 94, 96", Стара Лесна, (1991, 1992, 1996), Кошице, (1994);
 - Международных семинарах "Кварки - 94, 96, 98 и 2000", Владимир (1994), Ярославль (1996), Суздаль (1998) и Санкт-Петербург (2000);
 - Объединенном рабочем совещании ОИЯИ-РОС (Тайвань) по физике промежуточных и высоких энергий, Дубна, 1995;
 - Международном семинаре "Будущая физика на HERA", Гамбург, 1995/1996;
 - 3 Международной конференции "Ренормгруппа 96", Дубна, 1996;
 - Международной школе-семинаре "Структура частиц и ядер и их взаимодействия", Ташкент, 1997;
 - 8 и 9 Международных Ломоносовских конференциях по физике элементарных частиц, Москва, 1997 и 1999;
 - 13, 14 и 15 Международных семинарах по проблемам физики высоких энергий (ISNEPP 96, 98 и 2000) "Релятивистская ядерная физика и квантовая хромодинамика", Дубна, 1996, 1998 и 2000;
 - 35 Международном совещании в Морионе: КХД и адронные взаимодействия при высоких энергиях, Лес-Арк, 2000;
 - Международной европейской конференции по физике высоких энергий и квантовой хромодинамике: КХД-97: 25 лет КХД, Монпелье, 1997;
 - 4 и 5 Международных симпозиумах "Дубна Дейтрон 97", Дубна, 1997 и "Дубна Дейтрон 99", Дубна, 1999;
 - Рабочем совещании по спиновым эффектам в КХД, Дубна, 1998;
 - Рабочем совещании по структуре нуклона (N99), Фраскати, 1999;
 - IX Рабочем совещании по спиновым эффектам при высоких энергиях (SPIN 01), Дубна (2001);
 - 14 Международном рабочем совещании по физике высоких энергий и квантовой теории поля (QFTHEP'99), Москва, 1999;
 - 7, 8 и 9 Международных совещаниях по глубоконеупругому рассеянию и КХД (DIS 99, DIS 2000 и DIS 2001), Цойтен (1999), Ливерпуль (2000), Болонья (2001);
 - Рабочем совещании по поляризованным протонам при высоких энергиях, Гамбург, 1999;
 - Европейских конференциях по физике высоких энергий (EPS-HEP 99 и EPS-HEP 2001), Тампере (1999) и Будапешт (2001);
- на рабочих совещаниях экспериментальных коллабораций "Нейтринный детектор ИФВЭ-ОИЯИ" (Дубна, 1997-2000), NOMAD (Женева, 1998), HERMES (Гамбург, 1997).

Объем и структура работы. Диссертация изложена на 247 страницах и состоит из введения, пяти глав, заключения, список литературы включает 277 наименований, приведено 52 рисунка и 47 таблиц.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 36 работ.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. A. L. Kataev and A. V. Sidorov, "The Jacobi polynomials QCD analysis of the CCFR data for xF_3 and the Q^2 dependence of the Gross-Llewellyn-Smith sum rule, Phys. Lett. B **331** (1994) p. 179-186.
2. A. V. Sidorov, "The method of QCD analysis of structure functions based on a quadrature formula of the Gauss type, in: Proc. Int. Conf. Hadron Structure-91, Stara Lesna, Czecho-Slovakia, 1991, Physics and Applications, Kosice, 1992, p. 237-239.
3. A. V. Sidorov, "On determination of $\Lambda_{\overline{MS}}$ in QCD analysis of structure function", in: Proc. Int. Conf. Hadron Structure-92, Stara Lesna, Czechoslovakia, 6-11 Sep. 1992, p. 230-232.
4. A. L. Kataev and A. V. Sidorov, "The Q^2 dependence of the Gross-Llewellyn-Smith sum rule and of the parton distributions", in Proc. of International Seminar: Quarks - 94, Vladimir, Russia, 11-18 May 1994, p. 288-298; JINR Preprint JINR-E2-94-344, Dubna, 1994, p. 1-10.
5. A.V. Sidorov and M.V. Tokarev, "Nuclear effect in deuteron, Q^2 evolution of $F_3^{(N)}(x, Q^2)$ structure function and Gross-Llewellyn-Smith sum rule", Phys. Lett. **B358** (1995) p. 353-359.
6. A.V. Sidorov and D. B. Stamenov, "Fixed Point' QCD analysis of the CCFR data on deep inelastic neutrino - nucleon scattering", Preprint JINR **E2-95-107**, Dubna, 1995, p.1-7; hep-ph/9504301.
7. A. V. Sidorov and D. B. Stamenov, "Constraints on 'fixed point' QCD from the CCFR data on deep inelastic neutrino - nucleon scattering", Phys. Lett. **B357** (1995) p. 423-426.
8. A.V. Sidorov, "The QCD analysis of the structure functions and effective nucleon mass", Chinese J. Phys. **34** (1996) p. 916-919.
9. A. V. Sidorov and M. V. Tokarev, "On QCD Q^2 evolution of deuteron structure function $F_2^D(x_D, Q^2)$ for $x_D > 1$ ", Nuovo Cim. **109A** (1996) p. 1591-1598.

10. A.L. Kataev, A.V. Kotikov, G. Parente and A.V. Sidorov, "Next-to-next-to-leading order QCD analysis of the CCFR data for the deep-inelastic neutrino-nucleon Phys. Lett. **B388** (1996) p. 179-187.
11. A. V. Sidorov and D. B. Stamenov, "Constraints on 'second order fixed point' QCD from the CCFR data on deep inelastic neutrino nucleon scattering", Mod. Phys. Lett. **A11** (1996) p. 2187-2192.
12. A.V. Sidorov, "QCD analysis of the CCFR data for xF_3 and higher-twist contribution", Phys.Lett.**B389** (1996) p. 379-382.
13. W. D. Nowak, A. V. Sidorov and M. V. Tokarev, "On a possibility to determine the sign of the polarized gluon distribution", Nuovo Cim. **110A** (1997) p. 757-766.
14. A. V. Sidorov and M. V. Tokarev, "Experimental constraints on coefficients of α_s -expansion of Gottfried sum rule", Preprint JINR, E2-96-290, Dubna 1996, p. 1-10; *In Proc. of Intern. Workshop "Hamburg 1995/96, Future physics at HERA"*, p. 119-126 hep-ph/9608461.
15. A.V. Sidorov, "Next-to-next-to-leading order QCD analysis of combined data for xF_3 structure function and higher twist contribution", *JINR Rapid Comm.* **80** (1996) p. 11-16, hep-ph/9609345.
16. IHEP-JINR Neutrino Detector Collab., L.S. Barabash et al., "Measurement of xF_3 , F_2 structure functions and Gross-Llewellyn-Smith sum rule with IHEP-JINR neutrino detector", Preprint JINR E1-96-308 p.1-10, hep-ex/9611012.
17. A. L. Kataev, A. V. Kotikov, G. Parente and A. V. Sidorov, "Next-to-next-to-leading order QCD analysis of the revised CCFR data for xF_3 structure function", Phys. Lett. **B417** (1998) p.374-384.
18. M.V. Tokarev and A.V. Sidorov, "NNLO QCD analysis of CCFR data on xF_3 structure function and Gross-Llewellyn Smith sum rule with higher twist and nuclear corrections", *Il Nuovo Cim.* **A110** (1997) p. 1401-1409.
19. A. L. Kataev, A. V. Kotikov, G. Parente and A. V. Sidorov, "The QCD analysis of the revised CCFR data for xF_3 structure function: The next-to-next-to-leading order and Pade approximants", in *Proc. of High-Energy Physics International Euroconference on Quantum Chromodynamics: QCD 97: 25th Anniversary of QCD, Montpellier, France, 3-9 Jul 1997*, Nucl.Phys.Proc.Suppl., v.64, p.138-142, 1998, hep/ph/9709509.

20. E. Leader, A. V. Sidorov and D. B. Stamenov, "NLO QCD analysis of polarized deep inelastic scattering", *Int. J. Mod. Phys.* **A13** (1998) p. 5573-5592.
21. E. Leader, A. V. Sidorov and D. B. Stamenov, "Polarized parton densities in the nucleon", *Phys. Rev.* D58 114028 (1998) p. 1-13.
22. E. Leader, A. V. Sidorov and D. B. Stamenov, "Scheme dependence in polarized deep inelastic scattering", *Phys. Lett. B* 445 (1998) p. 232-238.
23. A. V. Sidorov, "QCD analysis of xF_3 structure function data and power correction to α_s ", *Nuovo Cim.* **A112** (1999) p. 1527-1530.
24. E. Leader, A. V. Sidorov and D. B. Stamenov, "How well do we know the polarized parton densities in the nucleon", in *Proc. of Workshop on Polarized Protons at High Energies - Accelerator Challenges and Physics Opportunities*, Hamburg 1999, p. 309-319.
25. E. Leader, A. V. Sidorov and D. B. Stamenov, "On the Sensitivity of the Polarized Parton Densities to SU(3) Breaking", *Phys. Lett. B* 488 (2000) p. 283-288.
26. E. Leader, A. V. Sidorov and D. B. Stamenov, "Polarized parton densities in the nucleon", preprint INRNE/2001-19, Sofia (2001) p. 1-4, to appear in *Proc. of 9th International Workshop on Deep Inelastic Scattering and QCD (DIS 2001)*, Bologna, Italy, 2001, hep-ph/0106214.
27. A. L. Kataev, G. Parente and A. V. Sidorov, "The NNLO QCD analysis of the CCFR data for xF_3 : Is there still the room for the twist 4 terms?", in: *Proc. 7th International Workshop on Deep Inelastic Scattering and QCD (DIS 99)*, Zeuthen, Germany, 19-23 Apr 1999, *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* **79** (1999) p. 93-95, hep-ph/9904332.
28. A. V. Sidorov *et al.* [IHEP-JINR Neutrino Detector Collaboration], "Measurement of xF_3 and F_2 structure functions in low Q^2 region with the IHEP-JINR neutrino detector", *Eur. Phys. J.* **C10** (1999) p. 405-408.
29. E. Leader, A. V. Sidorov and D. B. Stamenov, "A new study of the polarized parton densities in the nucleon", *Phys. Lett.* **B462** (1999) p. 189-194.
30. A. L. Kataev, G. Parente and A. V. Sidorov, "Higher twists and $\alpha_s(M_Z)$ extractions from the NNLO QCD analysis of the CCFR data for the xF_3 structure function", *Nucl. Phys.* **B573** (2000) p. 405-433.

31. A. L. Kataev, G. Parente and A. V. Sidorov, "The NNLO QCD analysis of the CCFR data for xF_3 : Q^2 dependence of the parameters", in: *Proc. of Intern. Workshop on the Structure of the Nucleon (Nucleon 99), Frascati, Italy, 7-9 Jun 1999*, Nucl. Phys. **A666-667** (2000) p. 184-189, hep-ph/9907310.
32. A. L. Kataev, G. Parente and A. V. Sidorov, In Proc. of International "QCD analysis of xF_3 at NNLO: The theoretical uncertainties", in: *Proc. Europhysics Conference on High-Energy Physics (EPS-HEP 99), Tampere, Finland, 15-21 Jul 1999*, p. 456-457, hep-ph/9910378.
33. A. L. Kataev, G. Parente and A. V. Sidorov, "The interplay between perturbative QCD and power corrections: The description of scaling or automodelling limit violation in deep-inelastic scattering", in: *Proc. of International Bogoliubov Conference on Problems of Theoretical and Mathematical Physics, Moscow, Russia and Kiev, Ukraine, 27 Sep - 6 Oct 1999*, Particles and Nuclei, v.31, part 7b, (2000) p. 29-37.
34. S. A. Kulagin and A. V. Sidorov, "Nuclear effects and higher twists in F_3 structure function", Eur. Phys. J. **A9** (2000) p. 261-267.
35. A. L. Kataev, G. Parente and A. V. Sidorov, "Application of new multiloop QCD input to the analysis of xF_3 data", Preprint CERN-TH/2000-343, Geneve, 2000, p. 1-7, hep-ph/0012014.
36. A. L. Kataev, G. Parente and A. V. Sidorov, "Fixation of theoretical ambiguities in the improved fits to the xF_3 CCFR data at the next-to-next-to-leading order and beyond", Preprint CERN-TH/2001-58, Geneve, 2001, p. 1-41, hep-ph/106221.

Рукопись поступила в издательский отдел
4 октября 2001 года.

Макет Н.А.Киселевой

Подписано в печать 08.10.2001
Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. л. 1,16
Тираж 100. Заказ 52889

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
Дубна Московской области