

339
Т41

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
ОРДЕНА КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ИНСТИТУТ ФИЗИКИ
им. Б.И.СТЕПАНОВА

УДК 539.172

ТИМОШИН Сергей Иванович

**СПИНОВЫЕ И РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПРОЦЕССАХ
РАССЕЯНИЯ НЕЙТРИНО И ЗАРЯЖЕННЫХ
ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ЛЕПТОНОВ НА ПОЛЯРИЗОВАННЫХ НУКЛОНАХ**

01.04.23 — физика высоких энергий

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Минск 1999 г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. В последнее десятилетие большое внимание уделяется изучению спиновой структуры нуклона и проверке правил сумм (ПС). В настоящее время основным источником информации о спиновых свойствах нуклона являются процессы глубоконеупругого рассеяния (ГНР) поляризованных лептонов (электронов и мюонов) на поляризованных нуклонах. Результаты экспериментов в SLAC и CERN не согласуются с ранее сложившимися кварк-партонами представлениями о природе нуклонного спина ("спиновый кризис") и показывают нарушение ПС Эллиса-Джаффе. Несмотря на огромные усилия этот "кризис" пока не удается разрешить до конца. Поэтому сейчас интенсивно исследуются возможности других реакций глубоконеупругого взаимодействия, например, рождения прямых фотонов и струй в $p\bar{p}$ -столкновениях, процессы Дрелла-Яна и т.д., для получения данных о спиновых структурных функциях (СФ) и их моментов, вкладов кварков и глюонов в нуклонный спин. С этой точки зрения определенными преимуществами обладают глубоконеупругие реакции с участием нейтрино благодаря их способности "различать" кварки и антикварки, "чувствовать" ароматы, а также благодаря наличию более широкого набора поляризационных наблюдаемых величин и СФ. Результаты нейтринных опытов также крайне желательны для проведения полноценного КХД-анализа всей совокупности поляризационных данных. Кроме того, как глубоконеупругие, так и (квази)упругие процессы νN -рассеяния дают возможность изучения других интересных спиновых эффектов.

Для извлечения достоверной информации об измеряемых величинах из экспериментальных данных необходим учет радиационных поправок (РП), которому обычно должен предшествовать расчет ненаблюдаемых радиационных эффектов (РЭ), сопровождающих основную реакцию. Повышение точности современных поляризационных экспериментов, планирование и подготовка новых опытов требуют, особенно в условиях "спинового кризиса", надежных расчетов РЭ и исследования их влияния на наблюдаемые величины.

В настоящее время выполнен расчет и детальный анализ электромагнитной поправки (ЭП) к лептонному току в процессах ГНР заря-

жечных поляризованных лептонов на поляризованных нуклонах и легких ядрах. Другой тип поправок -- к адронному току -- при анализе экспериментальных данных ранее не учитывался, поскольку предполагалось, что они малы.

В условиях экспериментов нового поколения РЭ адронов могут стать значительными. Поэтому необходима проверка высказанных относительно адронных РЭ предположений, прежде всего, с помощью их теоретических оценок.

В поляризационных опытах нового поколения, особенно на коллайдерах, слабые эффекты могут достигать масштаба электромагнитных эффектов. В такой ситуации необходимы, естественно, расчеты сразу электрослабых поправок (ЭСП) к ГНР поляризованных лептонов на поляризованных нуклонах. Что касается поляризационных процессов νN -ГНР, то РЭ и их влияние на наблюдаемые величины до сих пор систематически не исследовались.

Достигнутый прогресс в экспериментальных технологиях делает возможным постановку поляризационных нейтринных опытов в обозримом будущем. Следовательно, становится необходимой задача расчета РЭ и изучение их влияния на измеряемые величины в процессах ГНР нейтрино на поляризованных мишенях.

Связь работы с крупными научными программами, темами. Диссертационная работа выполнена в рамках программ (МО РБ):

- “Разработка новых методов исследования структуры и свойств частиц” (“Кварк09”), 1996-2000 г.г.
- “Новые методы и средства теоретического и экспериментального исследования взаимодействий и структуры частиц” (шифр “Физика фундаментальных взаимодействий”) в 1992-1995 г.г.

Тема: “Адаптация и развитие ковариантного метода расчета радиационных эффектов в процессах глубоконеупругого νN -взаимодействия” (№ госрегистрации 1993446).

- “Новые методы и средства исследования фундаментальных свойств микрообъектов материи” (шифр “Физика микромира”), 1996-2000 г.г.

Тема: “Расчет и исследование наблюдаемых величин с учетом радиационных эффектов в некоторых процессах ГНР поляризованных лептонов на поляризованных нуклонах” (№ госрегистрации 19962067).

Диссертация выполнялась также в рамках крупной темы “Поля и частицы” (шифр 01-3-1001-94/98) сотрудничества с ОИЯИ (г. Дубна, Россия), в которой разрабатывался раздел “Исследование процессов $\bar{\nu}N$ -ГНР в каналах заряженного и нейтрального токов в борновском приближении и с учетом радиационных эффектов”, отнесенный к теме **первого приоритета**.

Цели и задачи исследования. Цель данной диссертации -- предложение новых возможностей измерения кварковых вкладов в спин нуклона, спиновых СФ, функций распределения поляризованных кварков, формфакторов нуклона, параметра $\text{Sin}^2\Theta_w$ электрослабой теории и проверки некоторых ее положений на уровне спиновых эффектов, а также учет РЭ в наблюдаемых величинах в процессах рассеяния нейтрино и заряженных поляризованных лептонов на поляризованных нуклонах. В связи с этим в диссертации рассматриваются следующие **задачи**:

- Расчет и исследование наблюдаемых величин на уровне борновского приближения в процессах взаимодействия нейтрино с поляризованными нуклонами.

- Вычисление однопетлевой ЭСП к поляризационным процессам $\bar{\nu}N$ -ГНР с заряженным и нейтральным токами на основе ковариантного метода.

- Расчет и исследование наблюдаемых величин, в том числе с учетом РЭ, в процессах ГНР заряженных поляризованных лептонов на поляризованных нуклонах, индуцированных заряженным слабым током.

- Оценка вклада РЭ адронов в ЭП к поляризационным процессам $\bar{\nu}N$ -ГНР.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются микрообъекты материи и процессы их взаимодействия. Предмет исследования – спиновые и радиационные эффекты в процессах рассеяния нейтрино и заряженных поляризованных лептонов на поляризованных нуклонах.

Методология и методы проведенного исследования.

Расчеты наблюдаемых величин в поляризационных процессах $\bar{\nu}N$ - и $\bar{\nu}N$ -ГНР как в борновском приближении, так и с учетом РЭ проводились в рамках кварк-партонной модели (КПМ), адекватной постановке решаемых в диссертации задач.

При вычислении РП к указанным процессам использовался

универсальный ковариантный метод Бардина-Шумейко расчета РЭ. Этот метод был развит и адаптирован в настоящей диссертации для упругого рассеяния поляризованных точечных фермионов (с последующим применением к процессам IN-ГНР в КПМ) и глубоконеупругого νN -взаимодействия.

Достоинством ковариантного метода, отличающим его от других подходов к расчету РЭ, является то, что выражения для РП не содержат нефизического параметра мягкости фотона, формально разделяющего области мягких и жестких фотонов.

Научная новизна и значимость полученных результатов состоит в том, что

1. Предложено несколько новых схем определения вкладов кварковых ароматов и валентных кварков в нуклонный спин, а также спиновых СФ и функций распределений поляризованных валентных кварков с помощью различных наборов величин, измеряемых в процессах ГНР (анти)нейтрино и заряженных поляризованных лептонов на поляризованных мишенях.

2. Впервые разработаны способы:

а) измерения слабого аксиального формфактора F_A в поляризационных процессах (квази)упругого νN -рассеяния при любой энергии нейтринного пучка;

б) независимого определения $\text{Sin}^2\Theta_w$, который является одним из основных параметров электрослабой теории, из данных по упругому рассеянию (анти)нейтрино на поляризованных нуклонах.

3. Предложены новые возможности проверки универсальности глубоконеупругих взаимодействий (анти)нейтрино и гипотезы сохраняющегося векторного тока (СВТ) на уровне спиновых эффектов.

4. Впервые вычислены ЭСП к инклюзивным реакциям ГНР (анти)нейтрино на поляризованных нуклонах и поляризационному IN-ГНР с заряженным слабым током, выполнен подробный анализ их влияния на наблюдаемые величины.

5. Ковариантный метод расчета РЭ развит на случай взаимодействия поляризованных частиц для:

а) упругого рассеяния поляризованных точечных фермионов;

б) глубоконеупругого νN -взаимодействия;

в) IN-ГНР с заряженным слабым током.

6. Впервые последовательно, в двух независимых подходах, изучены РЭ адронов в ГНР поляризованных лептонов на продольно и поперечно поляризованных нуклонах, детально проанализирован их вклад в наблюдаемые величины, в том числе применительно к современным поляризационным экспериментам в CERN и SLAC.

7. Впервые вычислены лептонные ЭП к сечению ГНР поляризованных лептонов на поперечно поляризованных нуклонах и исследовано их влияние на поперечную поляризационную асимметрию.

8. Впервые получена оценка ЭП низшего порядка к зарядовым асимметриям в ГНР поляризованных лептонов на поляризованных нуклонах.

Практическая значимость полученных результатов. Результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы при обработке и интерпретации данных планируемых поляризационных экспериментов на ер-коллайдере HERA, будущих опытов по νN -рассеянию, например, на адронном коллайдере LHC (CERN). Результаты изучения РЭ адронов могут быть использованы при обработке данных в проводимых и планируемых с участием белорусских ученых экспериментах в ОИЯИ, CERN, SLAC, DESY по ГНР поляризованных мюонов и электронов на поляризованных мишенях.

Точные ковариантные формулы для ЭП к упругому поляризационному μe -рассеянию уже использовались для оценки РЭ в поляриметрической задаче (измерение поляризации мюонного пучка) в эксперименте SMC (CERN).

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

1. Схемы определения:

- а) вкладов кварковых ароматов и валентных кварков в спин нуклона;
- б) спиновых СФ нуклона,
- в) функций распределений поляризованных валентных кварков с помощью различных наборов величин, измеряемых в ГНР (анти)нейтрино и заряженных поляризованных лептонов на поляризованных мишенях, которые дают возможность получения новой и независимой информации о спиновой структуре нуклона.

2. Способ измерения слабого аксиального $(-)$ формфактора нуклона в поляризованных процессах (квази)упругого ν N-рассеяния при любой энергии нейтринного пучка.

3. Способ независимого определения $\text{Sin}^2\Theta_w$ из данных по упругому рассеянию (анти)нейтрино на поляризованных нуклонах, который является одним из основных параметров электрослабой теории.

4. Обоснование возможности проверки универсальности глубоко-неупругих ν N-взаимодействий и гипотезы СВТ на уровне спиновых эффектов.

5. Результаты расчетов ЭСП к наблюдаемым величинам в ГНР (анти)нейтрино на поляризованных нуклонах и поляризованному IN-ГНР с заряженным слабым током, указывающие на необходимость учета РП в соответствующих экспериментах, особенно в области малых значений x , измерения в которой имеют сейчас наибольший интерес для разрешения "спинового кризиса".

6. Развитие ковариантного метода расчета РЭ для поляризационных процессов:

- а) упругого рассеяния точечных фермионов;
- б) глубоконеупругого ν N-взаимодействия;
- в) IN-ГНР с заряженным слабым током.

7. Результаты оценок РЭ адронов в ГНР поляризованных лептонов на продольно и поперечно поляризованных нуклонах, позволяющие сделать вывод о незначительном влиянии их на поляризационные асимметрии, в том числе и в условиях экспериментов CERN и SLAC.

8. Результаты расчетов электромагнитной поправки к лептонному току в ГНР поляризованных лептонов на поперечно поляризованных нуклонах, показывающие ее существенное влияние на поперечную асимметрию в области $x \sim 0$, $y \sim 1$.

9. Результаты расчетов электромагнитного вклада в зарядовые асимметрии в ГНР поляризованных лептонов на поляризованных нуклонах, сравнимого по величине с вкладом γZ -интерференции и противоположного ему по знаку. Учет этого вклада в зарядовых асимметриях может улучшить возможность их использования для проверки различных моделей электрослабого взаимодействия.

Личный вклад соискателя. Диссертация выполнялась мной, С.И. Тимошиным, самостоятельно. Личный вклад автора в получение резуль-

татов и положений, выносимых на защиту, является решающим. В работах с соавторами соискатель осуществлял постановку задач в [2, 6, 8-18, 20-23] (в [3, 5, 7] она проводилась совместно) и получил основную часть результатов. В трудах [11-15, 20, 21], написанных в соавторстве с П.П.Кужир, Н.М.Шумейко и В.И.Лашкевичем, соискателю принадлежит разработка схем анализа спиновой структуры нуклона и спиновых эффектов в реакциях взаимодействия нейтрино с нуклонами. Работы [16-18, 22, 23] выполнялись совместно с моим учеником В.А.Зыкуновым. В совместных работах [2, 6, 8-10] с Н.М.Шумейко автор диссертации выполнил теоретические и численные расчеты электромагнитных эффектов, в том числе адронов. Статьи [1, 3-5, 7] написаны вместе с Т.В.Кухто и Н.М.Шумейко. В [1, 4] теоретические расчеты проводились нами независимо, и соискатель внес оригинальный вклад в получение конечного результата. В [3, 5, 7] диссертант выполнил аналитические расчеты и в значительной степени анализ численных результатов.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты, полученные в диссертации, докладывались и обсуждались на научных сессиях Отделения ядерной физики АН СССР (г.Москва, 1985, 1986 г.г.), Всесоюзном семинаре "Электромагнитные взаимодействия адронов в резонансной области энергий" (г.Харьков, 1985, 1987, 1989 г.г.), VII Международном симпозиуме по спиновым явлениям в физике высоких энергий (Протвино, 1986 г.), XIII, XV, XVI Международных Семинарах "Проблемы физики высоких энергий и теории поля" (Протвино, 1990, 1992, 1993 г.г.), Международном лептон-фотонном Симпозиуме (Итака, США, 1993 г.), Международной конференции по физике высоких энергий (Глазго, Шотландия, 1994 г.), IX Международный Семинар по физике высоких энергий и квантовой теории поля (Звенигород, 1994 г.), XI Международном Симпозиуме по спиновой физике высоких энергий (Блумингтон, США, 1994 г.), VI и VII Международном Семинаре "Нелинейные явления в сложных системах" (Минск, 1997, 1998 г.г.).

Опубликованность результатов. Результаты диссертации опубликованы в 14 статьях в научных журналах, 5 статьях в сборниках трудов конференций и семинаров, 4 тезисах докладов. Опубликованные материалы составляют 126 страниц.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения и четырех приложений. Диссертация содержит 190 страниц, включая 32 рисунка на 26 страницах, 5 таблиц на 7 страницах, 4 приложения на 17 страницах и

перечень использованных источников из 220 наименований на 18 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко описывается современное состояние спиновой физики высоких энергий, указывается круг проблем, нуждающихся в изучении, определяется направление исследования в диссертационной работе.

В Главе 1 излагается феноменология поляризационного IN-ГНР. Подробно обсуждаются результаты поляризационных опытов, в том числе “спиновой кризис” и предлагаемые пути выхода из него. Отмечается, что на сегодняшний день нет однозначной интерпретации экспериментальных данных. Поэтому необходимо проведение новых опытов и рассмотрение возможностей других реакций лептон-адронного взаимодействия. В связи с этим показана актуальность исследования нейтринных процессов ГНР, которые могут стать источником новой информации о спиновой структуре нуклона.

Вторая часть обзора посвящена обсуждению РЭ в процессах ГНР поляризованных лептонов на поляризованных нуклонах. Подчеркивается важность учета РП в таких опытах, что особенно важно в условиях “спинового кризиса”. Здесь также определяется место в этой проблеме задач, решаемых в диссертации. В данной главе приводится подробный обзор литературы по теме настоящей диссертации.

В Главе 2 (разд. 2.2 и 2.3) вычислены и исследованы борновские сечения и асимметрии процессов ГНР (анти)нейтрино на поляризованной мишени

$$\begin{matrix} (-) \\ \nu_1 + N \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} (+) \\ l \end{matrix} + X, \quad (1)$$

$$\begin{matrix} (-) \\ \nu_1 + N \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} (-) \\ \nu_1 \end{matrix} + X \quad (2)$$

с целью получения новой информации о спиновой структуре нуклона (вклады кварковых ароматов Δu , Δd , Δs и валентных кварков Δq_{val}) и его спиновых СФ. Подробно рассмотрен случай продольной поляризации нуклона, а также кратко обсуждается поперечная поляризация. С помощью набора наблюдаемых величин проведен детальный анализ воз-

можных поляризационных эффектов в реакциях (1), (2). Предложена общая схема определения вкладов кварковых ароматов в нуклонный спин, использующая наблюдаемую асимметрию A_{-}^{CC} и две дополнительные измеряемые величины, например, $g_A = F + D$ и

$$a_8 = \frac{1}{\sqrt{3}}(3F - D) \quad (F, D - \text{параметры } \beta\text{-распада нейтрона и гиперона):$$

$$g_A = \Delta u + \Delta \bar{u} - \Delta d - \Delta \bar{d} = 1.254, \quad (3)$$

$$a_8 = \frac{1}{\sqrt{3}}[\Delta u + \Delta \bar{u} + \Delta d + \Delta \bar{d} - 2(\Delta s + \Delta \bar{s})] = 0.397.$$

Действительно, из выражения для $A_{-}^{CC}(x, y)$ в случае протона получаем соотношение

$$-y_1^2(\Delta u + \Delta \bar{u}) + (\Delta d + \Delta \bar{d}) + (\Delta s + \Delta \bar{s}) = \frac{1}{2\sigma_0} \int \frac{dx}{x} A_{-}^{CC}(x, y) \times$$

$$\times \left(\frac{d^2 \sigma_v^{a,CC}}{dx dy} - \frac{d^2 \sigma_v^a}{dx dy} \right), \quad (4)$$

где $\sigma_0 = G^2 M E / \pi$, $d^2 \sigma_v^{a,CC} / dx dy$ — сечения процессов (1) на неполяризованной мишени, G — константа Ферми, M — масса нуклона, E — энергия (анти)нейтрино, $y_1 = 1 - y$; x и y — обычные скейлинговые переменные.

Очевидно, что решив систему уравнений (3), (4), можно найти вклады ароматов, например:

$$\Delta s + \Delta \bar{s} = \frac{1}{2(2 - y_1^2)} \left[\frac{1}{\sigma_0} \int \frac{dx}{x} A_{-}^{CC}(x, y) \left(\frac{d^2 \sigma_v^{a,CC}}{dx dy} - \frac{d^2 \sigma_v^a}{dx dy} \right) dx - \right.$$

$$\left. - \sqrt{3} a_8 (1 - y_1^2) + g_A (1 + y_1^2) \right]. \quad (5)$$

Вклады u -, d - кварков и антикварков нетрудно получить с помощью (3) и (5).

Рассмотрены также две упрощенные (не противоречащие современной экспериментальной ситуации) схемы анализа спиновой структуры протона, которые предполагают:

1) ароматовую симметрию поляризованного кваркового моря

$$\Delta \bar{u} = \Delta \bar{d} = \Delta \bar{s} = \Delta s; \quad (6)$$

2) малость поляризации моря или антикварков.

Предположение (6) позволяет уменьшить число дополнительных измеряемых величин при анализе протонного спина. Используя A_{\pm}^{CC} , находим с учетом (6) вклады валентных и странных кварков соответственно:

$$\begin{aligned} \Delta q_V &= \frac{1}{1+y_1^2} \left[\frac{1}{\sigma_{00}} \int_0^1 A_+^{CC}(x,y) \left(\frac{d^2\sigma_v^{a,CC}}{dx dy} + \frac{d^2\sigma_{\bar{v}}^{a,CC}}{dx dy} \right) dx + \right. \\ &\left. + \frac{1}{2}(1-y_1^2)g_A \right], \\ \Delta s &= \frac{1}{4(2-y_1^2)} \left[\frac{1}{\sigma_{00}} \int_0^1 A_-^{CC}(x,y) \left(\frac{d^2\sigma_v^{a,CC}}{dx dy} - \frac{d^2\sigma_{\bar{v}}^{a,CC}}{dx dy} \right) dx - \right. \\ &\left. - (1-y_1^2)\Delta q_V + \frac{1+y_1^2}{2}g_A \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Заметим, что (6) не играет принципиальной роли в нашем подходе, как это следует из вывода формулы (5).

Поскольку опытные данные не исключают того, что поляризация моря (E142) или антикварков (SMC) мала, здесь рассмотрена такая возможность.

Это позволяет определить спиновые СФ нуклона:

$$\begin{aligned} g_6^{vp,vn}(x) &= \frac{1}{2x\sigma_0} A_{vp,vn}^{CC}(x,y) \frac{d^2\sigma_{vp,vn}^{a,CC}}{dx dy}, \\ g_6^{\bar{v}p,\bar{v}n}(x) &= \frac{1}{2xy_1^2\sigma_0} A_{\bar{v}p,\bar{v}n}^{CC}(x,y) \frac{d^2\sigma_{\bar{v}p,\bar{v}n}^{a,CC}}{dx dy}, \\ g_1^{v,\bar{v}}(x) &= -2g_6^{v,\bar{v}}(x). \end{aligned} \quad (8)$$

Структурные функции $g_{1,6}^{v,\bar{v}}(x)$, определяемые соотношениями (8), дают возможность получить информацию о спиновых функциях распределения $\Delta u_V(x)$ и $\Delta d_V(x)$, непосредственно оценить Δq_V (без применения (7)).

Рассмотрена изоскалярная мишень N(с равным количеством протонов и нейтронов). В этом случае оценка вкладов Δq_V , а при условии (6) и Δs выражается только через наблюдаемые величины, которые мо-

гут быть получены в экспериментах по ГНР (анти)нейтринно на изоскалярной мишени, что особенно важно в условиях "спинового кризиса".

Аналогичный анализ спиновой структуры нуклона проведен с асимметриями $A_{\pm}^{CC}(x)$ и $A_{v,\bar{v}}^{CC}(x)$, определяемыми через сечения типа

$$\frac{d\sigma}{dx} = \int_0^1 dy \frac{d^2\sigma}{dx dy}.$$

Изучен вопрос об универсальном характере СФ, проявляющемся в нейтринных реакциях. Это свойство наблюдалось в неполяризованных опытах, а для спиновых СФ оно также имеет место и заключается в том, что если

$$\begin{aligned} \Delta s(x) = \Delta \bar{s}(x), \text{ то } g_1^{vN}(x) = g_1^{\bar{v}N}(x) \equiv g_1^{CC}(x); \\ \Delta s(x) = \Delta \bar{s}(x) = 0, \text{ то } g_6^{vN}(x) = g_6^{\bar{v}N}(x) \equiv g_6^{CC}(x). \end{aligned} \quad (9)$$

Тогда асимметрии A_{\pm} принимают вид

$$\begin{aligned} A_+^{CC,N}(x,y) = \frac{2xg_6^{CC}(x)}{F_2^{CC}(x)} \equiv A_+^{CC,N}(x), \\ A_-^{CC,N}(x,y) = -\frac{xg_1^{CC}(x)}{xF_3^{CC}(x)} \equiv A_-^{CC,N}(x), \end{aligned}$$

т.е. фактически зависят только от одной переменной x .

Таким образом, изучение u -зависимости $A_{\pm}^{CC,N}$ может стать своеобразным тестом величины поляризации моря.

Для сечений и асимметрий процессов (2) получены формулы, аналогичные соответствующим выражениям в случае заряженного тока, в которых вместо $F_i^{v(\bar{v})}(x)$, $g_i^{v(\bar{v})}(x)$ для СФ введены обозначения $F_i^0(x)$, $g_i^0(x)$. В силу тождественности начальных и конечных частиц соответствующие СФ для процессов (2) одинаковы. По этой причине асимметрии $A_{\pm}^{NC}(x,y)$ будут зависеть только от x :

$$\begin{aligned} A_+^{NC}(x,y) = \frac{2xg_6^0(x)}{F_2^0(x)} \equiv A_+^{NC}(x), \\ A_-^{NC}(x,y) = -\frac{g_1^0(x)}{F_3^0(x)} \equiv A_-^{NC}(x). \end{aligned}$$

Следовательно, измеряя $A_{\pm}^{NC}(x)$, можно определить СФ $g_{1,6}^0(x)$.

Исходя из свойства универсальности СФ $F_2(x)$ и $xF_3(x)$ в СС- и NC-реакциях, подтверждаемого на опыте, можно получить соотношение

$$\frac{A_{\pm}^{CC,N}}{A_{\pm}^{NC,N}} = \frac{g_{6,1}^{CC,N}(x)}{g_{6,1}^{0N}(x)}.$$

Таким образом, с одной стороны, вычисление величины отношения асимметрий A_{\pm} может служить проверкой универсального характера глубоконеупругих взаимодействий (анти)нейтрино на уровне спиновых эффектов, являясь в то же время (в силу (9)) прямым указанием на порядок величины поляризации моря. С другой стороны, для изоскалярной мишени получены оценки вкладов морских и валентных кварков в нуклонный спин непосредственно через наблюдаемые величины процессов (2).

Наконец, предложен способ извлечения СФ g_2 в случае поперечно поляризованной мишени в процессах (1), (2):

$$g_2^{vN(\bar{v}N)}(x) = \frac{1}{\sigma_0 x} \frac{d\sigma_{vN(\bar{v}N)}^{a,CC}}{dx} \left[(3)A_{v(\bar{v})}^{CC}(x) - \frac{2(1/6)}{\sin\theta} A_{v\perp(\bar{v}\perp)}^{CC}(x) \right],$$

$$g_2^0(x) = \frac{3}{\sigma_0 x} \left(\frac{d\sigma_{vN}^{a,NC}}{dx} - \frac{d\sigma_{\bar{v}N}^{a,NC}}{dx} \right) \left(A_{-}^{NC}(x) - \frac{1}{\sin\theta} A_{\perp}^{NC}(x) \right),$$

где θ — угол рассеяния.

В разд.2.4 проведены численные расчеты асимметрий для оценки масштаба наблюдаемых эффектов, которые показали, что абсолютные величины асимметрий достаточно велики ($A \sim 0.1$). Это еще раз свидетельствует в пользу экспериментального исследования процессов (1) и (2).

В разд. 2.5 рассматривается другой подход к исследованию спина протона в реакциях ГНР с заряженным током (1). Предложено использовать для анализа спиновой структуры нуклона новый набор наблюдаемых величин — моментов СФ и виртуальных W-бозон-нуклонных асимметрий $A_1(x)$, $A_6(x)$:

$$A_1(x) = \frac{2xg_1(x)}{F_2(x)}, \quad A_6(x) = \frac{2xg_6(x)}{xF_3(x)}, \quad (10)$$

построенных из полных сечений $\sigma_{3/2}^{1/2}$ и $\sigma_{-3/2}^{-1/2}$ поглощения виртуального W-бозона поляризованным нуклоном.

Для дейтронной поляризованной мишени получено соотношение

$$g_1^d(x) \simeq \frac{5}{18} g_1^{vd}(x),$$

как и для усредненной по спину СФ $F_2(x)$ в случае изоскалярной мишени. Аналогичное равенство с точностью порядка 5% имеет место для моментов СФ

$$\Gamma_1^{vd} \simeq \frac{18}{5} \Gamma_1^d.$$

Тогда полный кварковый вклад в протонный спин равен

$$\Delta\Sigma = \Delta q + \Delta\bar{q} = \frac{36}{5} \frac{\Gamma_1^d}{1 - \frac{3}{2}\omega_D}, \quad (11)$$

где $\Delta q = \Delta u + \Delta d + \Delta s$, $\omega_D = 0.05$ есть вероятность D-состояния в волновой функции дейтрона.

Вклады валентных Δq_V и странных кварков получаем через моменты другой независимой СФ — $g_6(x)$:

$$\Delta q_V = (\Gamma_6^{vd} + \Gamma_6^{\bar{v}d})(1 - \frac{3}{2}\omega_D)^{-1}, \quad (12)$$

$$\Delta s + \Delta\bar{s} = \frac{1}{2}(\Gamma_6^{vd} - \Gamma_6^{\bar{v}d})(1 - \frac{3}{2}\omega_D)^{-1}. \quad (13)$$

Подчеркнем, что формулы (12), (13) не требуют привлечения дополнительной информации, необходимы только данные по СФ. Однако, чтобы определить вклады отдельно u- и d-кварков в спин протона, необходимо использовать некоторую дополнительную измеряемую величину, например, g_A . Тогда из (3), (11), (12) получаем

$$\Delta u + \Delta\bar{u} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{36}{5} \Gamma_1^d - \Gamma_6^{vd} + \Gamma_6^{\bar{v}d} \right) \left(1 - \frac{3}{2} \omega_D \right) + g_A \right],$$

$$\Delta d + \Delta \bar{d} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{36}{5} \Gamma_1^d - \Gamma_6^{vd} + \Gamma_6^{\bar{v}d} \right) \left(1 - \frac{3}{2} \omega_D \right) - g_A \right]$$

Предложен способ определения СФ $g_6(x)$, играющей важную роль в анализе спиновой структуры нуклона. Связь между асимметрией $A_1^d(x)$ и аналогичными нейтринными асимметриями $A_1^{vd, \bar{v}d}(x)$

$$A_1^d(x) \simeq A_1^{vd}(x) = A_1^{\bar{v}d}(x)$$

позволяет исключить последние из наблюдаемых асимметрий $A_{v, \bar{v}}(x, y)$ и найти $A_6^{vd, \bar{v}d}(x)$. Затем, используя (10), можно получить и сами СФ $g_6^{vd, \bar{v}d}(x)$.

Проведен численный расчет $g_6(x)$ и $A_6(x)$ для $\bar{\nu} d$ -ГНР, который показал, что СФ и асимметрии для нейтрино и антинейтрино существенно различаются. Это является следствием влияния вклада в них поляризованных странных кварков. Поэтому измерение $g_6^{\bar{\nu}d}(x)$ и $A_6^{\bar{\nu}d}(x)$ может служить своеобразным тестом масштаба величины поляризации странных кварков и, следовательно, их роли в спиновой структуре протона.

В разд. 2.6. рассматриваются процессы (квази)упругого рассеяния (анти)нейтрино на поляризованных нуклонах

$$\bar{\nu} \mu + n(p) \rightarrow \mu^{-(+)} + p(n), \quad (14)$$

$$\bar{\nu} \mu + N \rightarrow \bar{\nu} \mu + N, \quad N = p, n. \quad (15)$$

Исходя из гипотезы СВТ, предложена схема измерения слабого аксиального формфактора F_A :

$$A_+^{\parallel} = p_N \frac{(G^2/2\pi) \text{Cos}^2 \theta_c}{d\sigma_v^a/dQ^2 + d\sigma_{\bar{v}}^a/dQ^2} f_{\parallel} (G_{E,M}^W; Q^2, y, E) F_A, \quad (16)$$

$$A_+^{\perp} = -p_N \frac{(G^2/2\pi) \text{Cos}^2 \theta_c \text{Sin} \theta}{d\sigma_v^a/dQ^2 + d\sigma_{\bar{v}}^a/dQ^2} f_{\perp} (G_{E,M}^W; Q^2, y, E) F_A,$$

где θ_c — угол Кабиббо;

$G_{E,M}^W = G_{E,M}^p - G_{E,M}^n$; $G_{E,M}^{p,n}$ — формфакторы Сакса, p_N — степень поляризации нуклона.

Подчеркнем, что F_A может быть определен из (16) при любых энергиях, в то время как извлечение его из разности неполяризованных сечений $d\sigma_v^a/dQ^2 - d\sigma_v^s/dQ^2$ (традиционный способ) ограничено сравнительно небольшими значениями $E_{v,\bar{\nu}}$, так как с ростом энергии соответствующая разность уменьшается.

Благодаря независимости отношения асимметрий (16) от F_A , есть возможность проверить гипотезу СВТ экспериментально по отклонению от теоретических предсказаний.

Формулы (16) справедливы для случая нейтрального тока (15), если $G_{E,M}^W \rightarrow (G_{E,M}^Z)_N, F_A \rightarrow (F_A^Z)_N, \cos^2\theta_c \rightarrow 1$.

Здесь

$$(G_{E,M}^Z)_{p,n} = (1/2 - \sin^2\theta_w)G_{E,M}^{p,n} - 1/2G_{E,M}^{n,p}, \quad (17)$$

$$(F_A^Z)_{p,n} = \pm 1/2F_A,$$

θ_w — угол Вайнберга.

Таким образом, выражения (17) демонстрируют дополнительную возможность измерения одного из основных параметров стандартной модели — $\sin^2\theta_w$. Действительно, $A_+^{\parallel}/A_+^{\perp}$ зависит в случае нейтрального тока исключительно от $\sin^2\theta_w$, значение которого можно найти только из данных по уругому рассеянию (15).

В Главе 3 вычислена полная однопетлевая ЭСП (поправка от диаграмм с петлями (V-вклада)+ вклад тормозного излучения (ТИ) (R-вклад)) к сечениям инклюзивных процессов ГНР (анти)нейтрино на поляризованных нуклонах. Расчет выполнен в схеме перенормировки на массовой поверхности и в калибровке Фейнмана. В разд. 3.2 рассмотрен случай заряженного тока. Сечения процессов ГНР (1) в приближении $O(\alpha^3)$ в КПМ выражаются через соответствующие сечения подпроцессов рассеяния (анти)нейтрино на поляризованных (анти)кварках

$$\nu_l^{(-)}(k_1, 0) + q_f^{(-)}(p_1, m_f) \rightarrow l^{(+)}(k_2, m_l) + q_f^{(-)}(p_2, m_f) \quad (18)$$

и партонные распределения.

Дифференциальные сечения порядка $O(\alpha^3)$ в (1) представлены в виде

$$\left. \frac{d^2\sigma}{dx dy} \right|_{\nu}^{(-)} = \left. \frac{d^2\sigma}{dx dy} \right|_{\nu}^{a} + \left. \frac{d^2\sigma}{dx dy} \right|_{\nu}^{p}, \quad (19)$$

где индексы а и р соответствуют рассеянию (анти)нейтрино на неполяризованных нуклонах и поляризационной части сечения для случаев продольно и поперечно поляризованных нуклонов.

Каждое слагаемое в правой части (19) параметризуется в виде суммы трех членов

$$\frac{d^2\sigma}{dx dy} \Big|_{\nu}^m = \frac{d^2\sigma^B}{dx dy} \Big|_{\nu}^m + \frac{d^2\sigma_R^H}{dx dy} \Big|_{\nu}^m + \frac{d^2\sigma_R^F}{dx dy} \Big|_{\nu}^m, \quad (20)$$

где $m=a, p$.

В первом слагаемом перед борновским сечением факторизуется поправка от V-вклада δ_{1-loop} , а также поправки, соответствующие ТИ мягких фотонов ($\delta_R^\lambda, \delta_{soft}$). Поправка δ_R^λ содержит инфракрасную расходимость (ИКР), которая выделена в сечении ТИ с помощью ковариантного метода Бардина-Шумейко и сокращается в сумме с δ_{1-loop}

$$\delta_{1-loop} + \delta_R^\lambda = \delta_{1-loop}^F = \delta_{1-loop}(\lambda^2 \rightarrow z^2),$$

где

$$z = S_N x_1 y / m_p, S_N = 2pk_1, x_1 = 1-x, \lambda - \text{“масса” фотона.}$$

Второе и третье слагаемые в (20) отвечают вкладам жесткого ТИ. Выражения для V-вклада, вклада жесткого ТИ и поправки δ_{soft} приведены в приложениях 1 и 2 диссертации.

В разд. 3.3 по аналогичной схеме выполнен расчет ЭСП к наблюдаемым величинам в поляризационных процессах $\langle \bar{\nu} \rangle N$ -ГНР, индуцированных нейтральным током (2).

Анализ результатов численного расчета ЭСП к поляризационным частям сечений процессов (1), (2) и асимметриям показывает следующее:

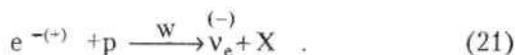
1. Поправка к поляризационным частям сечений (1) может составлять десятки процентов, причем значительную долю в нее вносит V-вклад.

2. Влияние ЭСП на асимметрии A_+^{cc} , A_-^{cc} незначительно; для A_+^{cc} оно существенно при малых x и, особенно, в области больших y , а для A_-^{cc} — при малых x и y .

3. Асимметрии процессов (2) испытывают заметное влияние ЭСП для $x \leq 0.7$, которое достигает 10%.

В Главе 4 проведен анализ спиновой структуры протона в процессах поляризационного ер-ГНР с обменом W-бозоном, которое планируется исследовать на коллайдере HERA. Выполнен расчет и исследование влияния ЭСП на наблюдаемые величины указанных процессов.

В разд.4.2 рассматриваются различные подходы к исследованию спина протона в реакциях



Поскольку эти процессы являются обратными к соответствующим нейтринным реакциям с заряженным током (1), то выражения для поляризационных частей сечений (21) получим, используя результаты разд. 2.2. Для этого необходимо сделать замены

$$\sigma_0 \rightarrow \chi_W = \frac{G^2 S_N}{2\pi} \left(\frac{1}{1+Q^2/M_W^2} \right)^2, \quad g_i^{v,\bar{v}} \rightarrow g_i^{e^-,e^+},$$

где M_W – масса W-бозона.

Затем для изучения спина протона применялись общая и упрощенные схемы, предложенные в разд. 2.2.

Так, например, используя совместно (3) и соотношение

$$\Delta u - y_1^2 (\Delta d + \Delta s) = \int_0^1 \frac{dx}{2x\chi_W} A_-(x,y) \left(\left. \frac{d^2\sigma}{dx dy} \right|_{e^-}^a - \left. \frac{d^2\sigma}{dx dy} \right|_{e^+}^a \right),$$

$$\text{где } \Delta q = \int_0^1 [\Delta q(x) + \Delta \bar{q}(x)] dx,$$

можно определить вклады кварковых ароматов Δu , Δd и Δs в спин протона.

Спиновую структуру протона в реакциях (21) можно исследовать и с помощью формализма, развитого в разд. 2.5. Все результаты, полученные там для нейтринных реакций легко переносятся и на процессы (21), если в соответствующих формулах сделать замены

$$\sigma_0 \rightarrow \chi_W; \quad F_i^{\bar{v}}, g_i^{\bar{v}} \rightarrow F_i^{e^-}, g_i^{e^-}; \quad F_i^v, g_i^v \rightarrow F_i^{e^+}, g_i^{e^+}.$$

Тогда асимметрии нейтринных процессов и (21) связаны следующим образом:

$$A_{\nu,\bar{\nu}}(x,y) = A_{e^+e^-}(x,y), \quad A_{1,6}^{\nu,\bar{\nu}}(x) = A_{1,6}^{e^+e^-}(x).$$

В разд. 4.2 вычислена ЭСП к инклюзивным процессам ГНР продольно поляризованных электронов (позитронов) на продольно поляризованных протонах в случае заряженного тока. При этом используется, как и в гл.3, перенормировка на массовой поверхности и калибровка Фейнмана.

Расчет ЭСП к сечениям процессов (21) выполняется по той же схеме, как и для нейтринных реакций в разд.3.2. Выражения, для величин, описывающих вклад жесткого ТИ, приведены в приложении 3.

Численные расчеты ЭСП $\delta_{e^{+(\pm)}}^{a,p}$ к сечениям (21), а также — с их учетом — продольных асимметрий $A_{\pm}(x,y)$ и $A_{e^+e^-}(x,y)$ проведены в кинематике коллайдера HERA. Основной вклад в $\delta_{e^{+(\pm)}}^p$, как и в случае процессов (1), дает δ_{1-loop} . Асимметрии $A_{e^+e^-}$ слабо зависят от y , а для A_{\pm} величина поправок растет с уменьшением x и y .

Например, величина ΔA_{\pm} при $x=0.5$ и $y=0.05$ составляет менее 9%, а при $x=0.1$ и $y=0.05$ достигает 35%. При средних и больших y она меньше 1% во всем интервале изменения x .

Поправка ΔA_{\pm} везде не превышает 4% и наиболее заметна при малых x и в области $x \geq 0.5$, $y < 0.6$.

В Главе 5 изучаются электромагнитные эффекты в процессах рассеяния заряженных поляризованных лептонов на поляризованных нуклонах.

В разд. 5.1 вычислена ЭП низшего порядка к упругому рассеянию поляризованных точечных частиц со спином 1/2 в такой постановке эксперимента, когда тормозной фотон не регистрируется. Расчет проведен в ковариантной форме и без использования каких-либо приближений на примере μe -рассеяния. Дифференциальное сечение порядка α^3 этого процесса может быть записана как

$$\frac{d\sigma}{dq^2} = \frac{d\sigma_0}{dq^2} + \frac{d\sigma_V^F}{dq^2} + \frac{d\sigma_R^F}{dq^2} + \frac{d\sigma_0}{dq^2} \frac{\alpha}{\pi} (\delta^L + \delta^\lambda + \delta^S + \delta_1^H) + \frac{d\sigma_2^H}{dq^2}. \quad (22)$$

Здесь $\frac{d\sigma_0}{dq^2}$ — борновское (безрадиационное) сечение, $\frac{d\sigma_V^F}{dq^2}$ — конечная часть V-вклада, которая равна

$$\frac{d\sigma_V^F}{dq^2} = \frac{d\sigma_0}{dq^2} + \frac{\alpha}{\pi}(\delta_{\text{vert}} + \delta_{\text{vac}}) + \frac{d\sigma_{\text{AMM}}}{dq^2} + \frac{d\sigma_{2\gamma}}{dq^2}. \quad (23)$$

Поправки типа δ в (22), (23) факторизуются перед упругим сечением так же, как в случае неполяризованных частиц. Второе и третье слагаемые (23) отвечают вкладам аномального магнитного момента и диаграмм двухфотонного обмена.

Слагаемое $d\sigma_2^H/dq^2$ в (22) представляет собой часть вклада жестких тормозных фотонов, который не факторизуется перед упругим сечением. Инфракрасная расходимость в сечении ТИ выделялась с помощью универсального ковариантного метода Бардина-Шумейко, который в данной диссертации получил развитие на случай упругого рассеяния точечных поляризованных фермионов. Эта расходимость сокращается с ИКР-частью V-вклада, результатом чего является поправка δ^2 . Оставшаяся (самая громоздкая) часть R-вклада, $d\sigma_R^F/dq^2$, вычислялась по следующей схеме.

1. Находилось полностью дифференциальное сечение ТИ.
2. Полученный шпур выражается через независимые инварианты и представлялся как полином инвариантов, содержащих импульс фотона.
3. Из полученного выражения вычиталось сечение, содержащее ИКР.
4. Выполнялось интегрирование по импульсу тормозного фотона методом тензорного интегрирования и таблицы скалярных интегралов.
5. Находилось однократное сечение $d\sigma_R^F/dq^2$.

Результаты вычисления этого сечения, а также $\delta_{2\gamma}$ приведены в приложении 4.

В разд. 5.2 в КПМ выполнен расчет ЭП порядка α к ГНР заряженных лептонов на поляризованных нуклонах в двух подходах.

1. Расчет (I): для вычисления ЭП к процессу lq -рассеяния использовались точные формулы для ЭП низшего порядка к упругому μe -рассеянию, полученные в разд.5.1.

2. Расчет (II): кварк-партоновая модель включалась с самого начала, и вычисление ЭП проводилось с максимально возможным применением компьютерной системы аналитических вычислений.

В обоих случаях основное внимание уделялось анализу ЭП к ад-

ронному току и их влиянию на продольную поляризационную асимметрию.

В расчете (I) поляризационная часть сечения порядка α^3 IN-ГНР получена в виде

$$d\Sigma_N^P(x,y) = \sum_q d\Sigma_0^P \frac{\alpha}{\pi} [(\delta^{IR} + \delta_S + \delta_0 + f_q \theta \delta_{2\gamma}^P) \Big|_{\xi=x} + \delta_1^H] + (d\Sigma_2^H)_N^P + ((d\Sigma_R^F)_N^P. \quad (24)$$

Учитывая сложность и громоздкость расчета поправок, а также потребность экспериментов с поляризованными пучками и мишенями в надежной процедуре РП данных, был выполнен независимый расчет (II) поляризационной части сечения IN-ГНР. В отличие от (24) здесь все вклады в нее суммируются и $d\Sigma_N^P(x,y)$ равна

$$\frac{d\Sigma_N^P}{dx dy} = \frac{d\Sigma_i^P}{dx dy} + \theta \frac{d\Sigma_i^P}{dx dy} + \frac{d\Sigma_q^P}{dx dy}. \quad (25)$$

Первое и третье слагаемые в (25) отвечают вкладам диаграмм, в которых дополнительный фотон (виртуальный или реальный) относится к лептонной и кварковой линии соответственно, а $\frac{d\Sigma_i^P}{dx dy}$ — их интерференции.

Отметим, что формулы для $\frac{d\Sigma_{i,i,q}^P}{dx dy}$ получены в таком компактном виде, что зависимость от массы кварка сведена до минимума.

Получены численные оценки адронных и других поправок к сечениям $1^{\pm}N$ -ГНР при энергии мюонов (электронов) в области 200-2000 ГэВ (10-16 ГэВ) и с их учетом проанализирована продольная асимметрия.

Численные оценки для адронных и лептонных ЭП к поляризационной части сечения демонстрируют их хорошее согласие в расчетах (I) и (II). Что касается роли РЭ адронов в продольной асимметрии, то для большей части кинематической области по x и y расчеты (I) и (II) приводят к одинаковому выводу, что влияние ЭП к адронному току на борновскую асимметрию является незначительным.

Неопределенности в вычислении ЭП в точности те же, что и в случае поправок к ГНР неполяризованных частиц. Они связаны с мас-

сами и функциями распределения кварков. Варьирование масс в широком диапазоне значений и выбор различных распределений не приводит к заметному изменению результатов. В этом смысле полученные в диссертации оценки поправок являются почти "модельно-независимыми".

Случай поперечной поляризации нуклона и поперечная поляризационная асимметрия с учетом ЭП в глубоконеупругом лептон-нуклонном рассеянии рассматриваются в разд. 5.3 диссертации.

Проводится феноменологическое вычисление ЭП к лептонному току в сечении ГНР продольно поляризованных лептонов на поперечно поляризованных нуклонах. Затем дан анализ результатов численного расчета этих поправок при энергиях мюонов (электронов) $E=200$ и 800 ГэВ (10 и 16 ГэВ) и с их учетом исследована поперечная асимметрия A_{\perp} . Асимметрия A_{\perp} в μ p- и ep-ГНР не превышает 2% и 10% соответственно. Поправка к ней становится существенной в области $x \sim 0$, $y \sim 1$.

С целью оценки адронных поправок к ГНР на поперечно поляризованной нуклонной мишени выполнены расчеты (I) и (II) полной ЭП порядка в КПМ. Выполнен численный расчет (II) ЭП, основная цель которого — получить оценки поправок к адронному току. Оценка лептонных ЭП в КПМ тоже представляет интерес, например, для сравнения с феноменологическим расчетом. Адронные и лептонные поправки к поляризационной части сечения по величине близки к их оценкам в случае продольной поляризации мишени. Учет ЭП к адронному току в поперечной асимметрии становится существенным с увеличением Q^2 .

В разд.5.4 обсуждаются РЭ в продольной асимметрии применительно к экспериментам CERN и SLAC. Анализ РП к поляризационной асимметрии A_1 показывает, что в измеряемой области x и Q^2 эксперимента EMC учет электромагнитных эффектов и пертурбативных КХД-эффектов не приводит к согласованию данных EMC и теории в области малых x . Вычислена продольная асимметрия с учетом ЭП в кинематической области экспериментов SMC и E142. Расчет (II) показал, что ЭП наиболее ощутима в области малых x . Во всей кинематической области этих экспериментов влияние ЭП к адронному току на асимметрию оказывается пренебрежимо малым. Например, наибольшее отклонение от борновской асимметрии составляет $\sim 0.2\%$ в обоих обсуждаемых экспе-

риментах. Следовательно, изменение поведения этой асимметрии здесь определяется, главным образом, вкладом лептонной поправки.

В разд. 5.5 рассматриваются электромагнитные эффекты в зарядовых асимметриях поляризационного IN-ГНР . В рамках КПМ вычислена полная однопетлевая ЭП к зарядовым асимметриям

$$C_{\uparrow\downarrow} = \frac{d\Sigma_N^+(\uparrow\downarrow) - d\Sigma^-(\uparrow\downarrow)}{d\Sigma_N^+(\uparrow\downarrow) + d\Sigma^-(\uparrow\downarrow)}, C_{\uparrow\uparrow} = \frac{d\Sigma_N^+(\uparrow\uparrow) - d\Sigma^-(\uparrow\uparrow)}{d\Sigma_N^+(\uparrow\uparrow) + d\Sigma^-(\uparrow\uparrow)},$$

где $d\Sigma_N^\pm[(\uparrow\downarrow)\uparrow\uparrow]$ — сечения $l^\pm\text{N-ГНР}$ в порядке α^3 , соответствующие (анти)параллельной ориентации продольных поляризаций лептона и нуклона.

Анализ результатов численного расчета ЭП к зарядовым асимметриям в поляризационном IN-ГНР показал, что ее вклад в эти асимметрии сравним по величине с вкладом $\gamma\text{-интерференции}$, но противоположен ему по знаку.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении перечислим основные результаты диссертации и выводы, сделанные на их основе.

1. На борновском уровне последовательно рассмотрены процессы ГНР (анти)нейтрино на поляризованных нуклонах [11,12,14,19-21] и поляризационное IN-ГНР с заряженным слабым током [18,19,23]. Предложено несколько схем извлечения вкладов кварковых ароматов и валентных кварков в спин нуклона, определения спиновых СФ нуклона и функций распределений поляризованных валентных кварков с помощью различных наборов измеряемых величин. Показана возможность теста универсальности глубоконеупругих $(\bar{\nu})\text{N-взаимодействий}$.

2. Предложены новые возможности измерения слабого аксиального формфактора нуклона в экспериментах по (квази)упругому рассеянию (анти)нейтрино на поляризованных нуклонах без ограничения по энергии нейтринного пучка и проверки гипотезы СВТ. Показано, что значение $\text{Sin}^2\theta_W$ может быть определено независимо из данных по поляриза-

ционному упругому νN -рассеянию. Эти результаты опубликованы в работах [13,15].

3. Вычислены ЭСП к ГНР (анти)нейтрину на поляризованных нуклонах с заряженным [17] и нейтральным токами, а также к поляризационному ер-ГНР с заряженным током [18,23].

Влияние ЭСП на асимметрии $A_+^{CC}(x,y)$ и $A_v^{CC}(x,y)$ оказывается незначительным во всей кинематической области.

Для $A_v^{CC}(x,y)$ наиболее существенное влияние ЭСП имеет место при малых x , и особенно, в области больших y .

Поправка к $A_-^{CC}(x,y)$ является заметной в области малых x и y . Поскольку экспериментальные данные именно в области малых x имеют решающее значение для разрешения "спинового кризиса", а $A_-^{CC}(x,y)$ играет ключевую роль в определении вкладов кварковых ароматов (особенно поляризации странных кварков) в спин нуклона, то учет обсуждаемой ЭСП будет необходим в нейтринных экспериментах.

Влияние ЭСП к асимметриям в процессах νN -ГНР, индуцированных нейтральным током, наиболее существенно для $x \leq 0.7$ и достигает 10%. Понятно, что в этой экспериментально измеряемой области x такая поправка к $A_{\pm,v}^{NC}(x,y)$ не может быть проигнорирована в будущих нейтринных опытах с поляризованными мишенями.

Что касается ер-ГНР, то ЭСП к поляризационным асимметриям становится наиболее существенной в области малых x . Так как именно эта область будет представлять наибольший интерес в будущих поляризационных экспериментах на HERA, то важную роль в них должна играть процедура РП данных.

4. Получены точные ковариантные формулы для ЭП низшего порядка к упругому рассеянию поляризованных точечных частиц со спином 1/2 [1,4].

5. Вычислена полная ЭП порядка α к ГНР поляризованных лептонов на поляризованных нуклонах в КИМ в двух независимых схемах расчета [2,6,10,16,22]. Получены оценки адронных ЭП к наблюдаемым величинам в l^*N -ГНР при энергиях лептонов 10-2000 ГэВ. ЭП к адронному току не оказывает заметного влияния на продольную асимметрию и не превышает 1%. Хотя не исключено, что при $y \sim 1$, РЭ адронов могут существенно влиять на поведение этой асимметрии. Модельные оценки лептонной ЭП удовлетворительно согласуются с результатами ее

феноменологического расчета, что дает возможность вычисления полной поправки в рамках единого подхода.

6. Вычислены лептонные ЭП к наблюдаемым величинам в \bar{N} -ГНР для поперечной поляризации нуклона [3,5]. Численные расчеты, проведенные для энергий лептонов 10-800 ГэВ, показали, что вклад этих поправок в асимметрию A_{\perp} становится существенным в области $x \sim 0$, $y \sim 1$. Получена оценка адронных ЭП к ГНР поляризованных лептонов на поперечно поляризованных нуклонах [10,16], которые являются заметными для поперечной асимметрии с ростом Q^2 .

7. Учет электромагнитных эффектов и пертурбативных КХД-эффектов в продольной асимметрии [8,9] не приводит к согласованию данных EMC и теории в области малых x . В кинематической области экспериментов SMC и E142 влияние адронных ЭП [16] на продольную асимметрию оказывается пренебрежительно малым, и, следовательно, изменение ее поведения определяется вкладом ЭП к лептонному току.

8. Вклад однопетлевой ЭП [7] в зарядовые асимметрии в ГНР поляризованных лептонов на поляризованных нуклонах сравним по величине с вкладом γz -интерференции, но противоположен ему по знаку. Учет этого вклада может улучшить возможность использования зарядовых асимметрий для проверки моделей электрослабого взаимодействия.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Кухто Т.В., Тимошин С.И., Шумейко Н.М. Ковариантное вычисление радиационной поправки к упругому рассеянию поляризованных частиц со спином $1/2$ // Весті АН БССР. - 1986. - N2. - с.85-90.

2. Тимошин С.И., Шумейко Н.М. Радиационные эффекты адронов в глубоконеупругом рассеянии поляризованных лептонов на поляризованных нуклонах // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Общая и ядерная физика. - 1986. - в.1(34). - с.24-25.

3. Кухто Т.В., Тимошин С.И., Шумейко Н.М. Поперечная поляризационная асимметрия в неупругом рассеянии лептонов на нуклонах // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Общая и ядерная физика. - 1986. - в.1(34). - с.25-26.

4. Kukhto T.V., Shumeiko N.M., Timoshin S.I. Radiative corrections in polarized electron-muon elastic scattering // J.Phys. - 1987. - Vol.G13,N6. - P.725-734.

5. Кухто Т.В., Тимошин С.И., Шумейко Н.М. Поперечная поляризационная асимметрия с учетом радиационных эффектов в глубоконеупругом лептон-нуклонном рассеянии // Доклады АН БССР. - 1987. - Т.31,N2. - с.138-140.

6. Shumeiko N.M., Timoshin S.I. Electromagnetic effects of hadrons in deep inelastic scattering of polarized leptons by polarized nucleons // The spin phenomenas in high energy Phys.: Proc. VII Int. Symp., Protvino, 1987. - Protvino, 1988. - Vol.2. - P.58-59.

7. Кухто Т.В., Тимошин С.И., Шумейко Н.М. Радиационные эффекты в зарядовых асимметриях глубоконеупругого рассеяния поляризованных лептонов на поляризованных нуклонах // Вопросы атомной науки и техники. Серия : Общая и ядерная физика. - 1988. - в.1(41). - с.62-63.

8. Тимошин С.И., Шумейко Н.М. Поляризационная асимметрия глубоконеупругого мюон-нуклонного рассеяния с учетом электромагнитных поправок в условиях эксперимента EMC // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Ядер. физ. иссл. (теория и эксперимент). - 1990. - в.1(9). - с.95-96.

9. Nguen Z.T., Timoshin S.I., Shumeiko N.M. QCD and electromagnetic effects in polarization asymmetry of deep inelastic lepton-nucleon scattering under EMC experiment conditions // Problems high energy physics and field theory: Proc. XIII Workshop, Protvino, 9-13 July 1990. - М.:Наука, 1991. - с.257-262.

10.Shumeiko N.M., Timoshin S.I. The lowest order total electromagnetic correction to the deep inelastic scattering of polarized leptons on polarized nucleons // J.Phys. - 1991. - Vol.G17. - P.1145-1157.

11.Kuzhir P.P., Shumeiko N.M., Timoshin S.I. The analysis of some observables in the deep inelastic scattering of (anti) neutrino by polarized nucleons // Problems high energy Phys. and field theory: Proc. XV Workshop, Protvino, July 6-10, 1992. - Protvino, 1995. - P.231-238.

12.Kuzhir P.P., Shumeiko N.M., Timoshin S.I. The deep inelastic scattering of (anti) neutrino by polarized nucleons // Problems high energy

phys. and field theory: Proc. XVI Workshop, Protvino, Sept. 14-17, 1993. - Protvino, 1995. - P.231-236.

13.(Quasi) elastic (anti) neutrino scattering on the polarized nucleons / P.P.Kuzhir, V.I.Lashkevich, N.M.Shumeiko, S.I.Timoshin // High energy phys. and quant. field theory: Proc. IX Int. Workshop, Zvenigorod, 1994. - Изд-во МГУ, 1995. - P.71-74.

14.Кужир П.П., Тимошин С.И., Шумейко Н.М. Глубоконеупругое рассеяние (анти)нейтрино на поляризованных нуклонах // ЯФ. - 1995. - Т.58,№3. - с.507-515.

15.(Квази)упругое рассеяние (анти)нейтрино на поляризованных нуклонах / П.П.Кужир, В.И.Лашкевич, С.И.Тимошин, Н.М.Шумейко // ЯФ. - 1995. - Т.58,№12. - с.2235-2238.

16.Зыкунов В.А., Тимошин С.И., Шумейко Н.М. О влиянии радиационных поправок к адронному току на наблюдаемые величины в глубоконеупругом рассеянии поляризованных лептонов на поляризованных нуклонах // ЯФ. - 1995. - Т.58,№11. - с.2021-2028.

17.Зыкунов В.А., Тимошин С.И., Шумейко Н.М. Электрослабая поправка к поляризованному глубоконеупругому рассеянию (анти)нейтрино на

нуклонах. Заряженный слабый ток // ЯФ. - 1997. - Т.60,№8. - с.1415-1424.

18.Shumeiko N.M., Timoshin S.I., Zykunov V.A. Investigation of the proton spin by electron-proton colliders // J.Phys. - 1997. - Vol.G23. - P.1593-1608.

19.Тимошин С.И. Глубоконеупругое рассеяние с заряженным током и спин протона // ЯФ. - 1998. - Т.61,№1. - с.119-124.

20.Kuzhir P.P., Shumeiko N.M., Timoshin S.I. New possibilities of the investigation of the nucleon spin in the neutrino experiments // Lepton and photon interactions: Theses talk at XVI Int. Symp., Ithaca, New York, 10-15 August 1993 / American Inst. Phys. - New York, 1994. - Ref.N142, P.769.

21.Kuzhir P.P., Shumeiko N.M., Timoshin S.I. Quarks' flavors and spin structure functions in the deep inelastic scattering of (anti)neutrino on polarized target // High energy physics: Theses talk at 27th Int. Conf., Glasgow, 20-27 July 1994. - Ref.0143.PU-PHY-94/01.

22. Shumeiko N.M., Timoshin S.I., Zykunov V.A. On influence of radiative corrections to hadron current on observable quantities in polarized deep inelastic scattering of leptons by nucleons // High energy spin physics: Theses of talk 11th Int. Symp., Bloomington, USA, 15-22 Sep. 1994.

23. Зыкунов В.А., Тимошин С.И. Применение системы аналитических вычислений REDUCE для исследования радиационных эффектов в поляризационных процессах глубоконеупругого рассеяния заряженных лептонов и нейтрино нуклонами // Компьютерная алгебра в фундаментальных и прикладных исследованиях и образовании: Тез. докл. межд. научн. конф., Минск, 8-11 декабря 1997 г. / БГУ. - Минск, 1997. - с.121-124.

РЕЗЮМЕ

Резюме. С.И.Тимошин “Спиновые и радиационные эффекты в процессах рассеяния нейтрино и заряженных поляризованных лептонов на поляризованных нуклонах”.

Ключевые слова: глубоконеупругое рассеяние, спин нуклона, спиновая структурная функция, сечение рассеяния, лептон, (анти) нейтрино, формфактор, радиационный эффект, асимметрия, кварк, электромагнитная поправка, электрослабая поправка.

Исследованы спиновые эффекты в процессах рассеяния нейтрино и заряженных лептонов на нуклонах. Предложены новые схемы определения кварковых вкладов в спин нуклона, его спиновых структурных функций с помощью различных наборов наблюдаемых величин. Показаны возможности измерения слабого аксиального формфактора в широкой области энергий нейтрино и проверки гипотезы сохраняющегося векторного тока. Ковариантный метод расчета радиационных эффектов развит и распространен на поляризационные процессы упругого и глубоконеупругого рассеяния нейтрино, заряженных лептонов и нуклонов. В калибровке Фейнмана вычислены электрослабые поправки к глубоконеупругому рассеянию нейтрино (заряженный и нейтральный токи) и поляризованных лептонов (заряженный ток) на поляризованных нуклонах. Получены точные ковариантные выражения для электромагнитной поправки низшего порядка к упругому рассеянию точечных по-

ляризованных фермионов. В кварк-партоной модели в двух независимых схемах вычислена такая поправка к глубоконеупругому рассеянию поляризованных лептонов на продольно и поперечно поляризованных нуклонах. Проведен детальный анализ влияния поправки к адронному току на наблюдаемые асимметрии, в том числе для современных поляризационных экспериментов. Сделан вывод, что в их кинематической области роль радиационных эффектов адронов незначительна. Вычислен вклад однопетлевой электромагнитной поправки в зарядовые асимметрии, учет которого может улучшить возможность использования последних для проверки моделей электрослабого взаимодействия.

Резюме. С.І.Цімошін “Спіновыя і радыяцыйныя эфекты ў працэсах рассеяння нейтрына і заражаных палярызаваных лептонаў на палярызаваных нуклонах”.

Ключавыя словы: глыбоканыпругкае рассеянне, спін нуклона, спінавая структурная функцыя, сячэнне рассеяння, лептон, (анты) нейтрына, формфактар, радыяцыйны эфект, асіметрыя, кварк, электрамагнітная папраўка, электраслабая папраўка.

Даследаваны спіновыя эфекты ў працэсах рассеяння нейтрына і заражаных лептонаў на нуклонах. Прапанаваны новыя схемы вызначэння кваркавых ўкладаў ў спін нуклона, яго спінавых структурных функцый з дапамогай розных набораў назіраемых велічыняў. Паказаны магчымасці вымярэння слабага аксіяльнага формфактара ў шырокай вобласці энергій нейтрына і праверкі гіпотэзы вектарнага току, які захоўваецца. Каварыянтны метадаў разліку радыяцыйных эфектаў развіты і распаўсюджаны на палярызацыйныя працэсы пругкага і глыбоканыпругкага рассеяння нейтрына, заражаных лептонаў і нуклонаў. У каліброўцы Фейнмана вылічаны электраслабыя папраўкі да глыбоканыпругкага рассеяння нейтрына (заражаны і нейтральны ток) і палярызаваных лептонаў (заражаны ток) на палярызаваных нуклонах. Атрыманы дакладныя каварыянтныя выражэнні для электрамагнітнай папраўкі ніжэйшага парадку да пругкага рассеяння кропкавых палярызаваных ферміёнаў. У кварк-партонай мадэлі у двух незалежных схемах вылічана такая папраўка да глыбоканыпругкага рассеяння палярызаваных лептонаў на падоўжана і папярочна палярызаваных нуклонах. Праведзены дэтальны аналіз уплыву папраўкі да адроннага току на назіраемыя асіметрыі, у

тым ліку для сучасных поляризацыйных эксперыментаў. Зроблены вывад, што ў іх кінематычнай вобласці роля радыяцыйных эфектаў адносна значная. Вылічаны ўклад аднапятлявы электрамагнітнай папраўкі ў зарадавыя асіметрыі, улік якога можа палепшыць магчымасць выкарыстання апошніх для праверкі мадэляў электраслабага ўзаемадзеяння.

Summary. S.I.Timoshin "Spin and radiative effects in the processes of neutrino and charged polarized leptons scattering on polarized nucleons".

Keywords: deep inelastic scattering, nucleon spin, spin structure function, cross section, lepton, (anti) neutrino, formfactor, radiative effect, asymmetry, quark, electromagnetic correction, electroweak correction.

Spin effects in the processes of neutrino and charged leptons scattering on nucleons have been investigated. New schemes for the determination of the quark contributions to the nucleon spin, its spin structure functions have been proposed with the help of different sets of observable quantities. The possibilities to measure weak axial formfactor in wide region neutrino energies and to test the hypothesis of the conserving vector current have been shown. The covariant calculation method for radiative effects has been developed for polarized processes of neutrino, leptons and nucleons elastic and deep inelastic scattering. The electroweak corrections to deep inelastic scattering of neutrino (charged and neutral currents) and polarized leptons (charged current) on polarized nucleons in Feynman gauge have been calculated. Exact covariant expressions have been obtained for the lowest order electromagnetic correction to elastic scattering of the pointlike polarized fermions. Such correction to deep inelastic scattering of polarized leptons on longitudinally and transversally polarized nucleons has been calculated in the quark-parton model with two independent approaches. The detailed analysis of the correction influence on the hadron current on the observed asymmetries has been made, modern polarized experiments being included. The conclusion has been derived that in their kinematic region the role of hadrons radiative effects is small. The contribution of one-loop electromagnetic correction into the charged asymmetries has been calculated. This can improve the possibility of these asymmetries use for the test of electroweak interaction models.

ТИМОШИН СЕРГЕЙ ИВАНОВИЧ

СПИНОВЫЕ И РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПРОЦЕССАХ
РАССЕЯНИЯ НЕЙТРИНО И ЗАРЯЖЕННЫХ
ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ЛЕПТОНОВ НА ПОЛЯРИЗОВАННЫХ
НУКЛОНАХ

Подписано к печати 4.1. 1999 г. Формат 60x90 1/16
Тип бумаги – типографская. Печать офсетная. Объем 2,13 печ.л.
Уч. изд. л. 1,7. Тираж 100 экз. Заказ 1. Бесплатно.

Институт физики им. Б.И.Степанова НАН Беларуси
220072, Минск, пр. Ф.Скорины, 70.
Отпечатано на ризографе Института физики им. Б.И.Степанова
НАН Беларуси
Лицензия ЛП №20 от 20.08.1997г.