



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

2-2003-73

УДК 539.12:539.171

**ТЕРЯЕВ**  
Олег Валерианович

**ГЛЮОННАЯ СТРУКТУРА НУКЛОНА  
И СПИНОВЫЕ АСИММЕТРИИ**

Специальность: 01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Дубна 2003

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

Научный консультант:

доктор физико-математических наук,  
профессор

А.В. Ефремов

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

С.Б. Герасимов

доктор физико-математических наук,

профессор

И.Ф. Гинзбург

доктор физико-математических наук,

профессор

И.М. Дремин

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Институт ядерных исследований РАН, Москва.

Защита диссертации состоится на заседании специализированного совета Д047.01.01 в Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2003 г. по адресу г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2003 г.

Ученый секретарь совета  
доктор физико-математических наук

  
С.В.Голоскоков

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность темы.

Задача описания спиновых эффектов в жестких лептонных и адронных процессах является актуальной для современной теории сильных взаимодействий при высоких энергиях, поскольку позволяет исследовать тонкие детали применения квантовой хромодинамики (КХД), лежащей в ее основе. Интерес к исследованию данной проблемы обусловлен появлением все новых и новых экспериментальных данных и теоретических исследований, что связано как с введением в строй новых ускорителей, так и с усовершенствованием существующих. Результаты экспериментов заставляют вносить коррективы в имеющиеся теоретические схемы. Спиновые эффекты при этом являются гораздо более чувствительными к деталям теоретического описания, чем усредненные по спину сечения. Такая чувствительность отнюдь не удивительна: лагранжиан взаимодействия элементарных частиц в большой степени определяется их спином. Так, уже первые наблюдения поперечной поляризации барионов в конце 60-х годов стали свидетельством неприменимости простейшей модели полюсов Редже и необходимости учета интерференции полюсов и разрезов. Впоследствии оказалось, что такая поляризация при соударениях неполяризованных адронов (подобные асимметрии называют одиночными – в данном случае единственная поляризованная частица наблюдается в конечном состоянии) не обращается в нуль и при весьма больших поперечных импульсах  $p_T \sim 2$  ГэВ. Этот факт явился полнейшей неожиданностью и, казалось, абсолютно противоречил всем представлениям о нуклоне, основанным на партонной его картине. Дальнейшие экспериментальные исследования подтвердили и уточнили эту картину. Поляризация оказалась слабо зависящей от энергии, но сильно зависящей от поперечного импульса, а именно – растущей с его ростом. Были исследованы и другие одиночные спиновые асимметрии, когда фик-

сируется поляризация единственной частицы не в конечном, а в начальном состоянии. Эффекты оказались весьма велики, а основные кинематические свойства поляризации – слабая зависимость от энергии и рост с поперечным импульсом – имеют место и здесь. Такое поведение указывает на наличие жесткого партонного подпроцесса, однако динамическое описание поляризации требует выхода за рамки наивной партонной модели. Калибровочно-инвариантный подход к поперечной поляризации оказывается связанным с учетом кварк-глюонных корреляций, не имеющих вероятностной интерпретации.

Наконец, последним по времени спиновым эффектом, открытие которого оказало (и продолжает оказывать в течение более 10 лет) значительное влияние на развитие физики высоких энергий, стал т.н. "спиновый кризис", открытый Европейской Мюонной Коллаборацией (EMC) в 1987-1988 гг., и исследовавшийся впоследствии коллаборациями SMC, E153, E155. Суммарный вклад спинов кварков в спин протона, который мог бы, наивно рассуждая, быть равным  $1/2$ , в действительности оказался совместим с нулем. Последующие исследования уточнили этот результат и по современным представлениям спин кварков составляет около 30% протонного. И здесь оказывается необходимым учет глюонных степеней свободы, на этот раз проявляющихся за счет аксиальной аномалии.

Цель диссертации состоит в построении последовательной теории влияния глюонной компоненты нуклона на различные спиновые асимметрии.

Научная новизна и практическая ценность. В диссертации открыто новое направление в теории спиновых эффектов при высоких энергиях – учет вклада глюонной аксиальной аномалии и кварк-глюонных корреляторов твиста три в спиновые структурные функции.

Впервые предложено описание низкоэнергетической спиновой структуры нуклона в терминах сохраняющегося кварк -

глюонного тока, отличающегося от кваркового тока, связанного с первым моментом структурной функции  $g_1$ , на величину вклада глюонной аксиальной аномалии. Сформулировано обобщение понятия аномалии на случай нелокальных операторов на световом конусе, и на этой основе впервые установлена  $x$ -зависимость аномального глюонного вклада.

Впервые рассмотрен вклад аксиальной аномалии в спиновую структурную функцию фотона и получено связанное с ним правило сумм.

Сформулирован оригинальный факторизационный подход к поперечной поляризации нуклона, учитывающий все нелокальные кварк-глюонные операторы твиста три и применимый как к глубоконеупругому рассеянию, так и к более сложным адронным процессам. Впервые установлено, что массовым параметром поперечной поляризации является масса поляризованного нуклона, выявлен динамический механизм перенормировки массы кварка глюонным полем адрона, обеспечивающий это свойство. Получено новое точное правило сумм, связывающее спиновые структурные функции. Предложена модель, связывающая поведение правил сумм Буркхардта - Коттингэма и Герасимова - Дрелла - Хирна, и на ее основе предсказано поведение последнего в переходной области.

Впервые предложен механизм возникновения фазовых сдвигов за счет вкладов твиста 3 (которые необходимы для объяснения одиночных спиновых асимметрий, описывающих взаимодействие в конечном состоянии между активным партоном и адронным остатком). Вычислены асимметрии для процессов комптоновского типа. Посредством аналитического продолжения впервые исследованы  $T$  - нечетные функции фрагментации твиста 3 и получена факторизационная формула для поляризации барионов, образованных в аннигиляции неполяризованных электронов и позитронов. Получено новое правило сумм для зависящих от поперечного импульса  $T$ -нечетных функций фрагментации. Предложены и исследованы в качестве пробника

спиновой структуры адронов различные асимметрии дилептонов.

На защиту выдвигаются следующие результаты.

1. Установлено, что глюонный вклад в первый момент продольной спиновой структурной функции определяется топологическим током, фиксируемым аксиальной аномалией. При этом калибровочно инвариантный кварковый аксиальный ток определяет первый момент, извлекаемый из экспериментальных данных по глубоконеупругому рассеянию, в то время как сохраняющийся кварк-глюонный ток может быть сопоставлен с низкоэнергетической спиновой структурой. Отличие этих двух величин и объясняет так называемый спиновый кризис.
2. Установлена связь между зависимостью аномального глюонного вклада от массы кварков и частичным сокращением нормального и аномального вкладов в дивергенцию аксиального тока. Вычислен вклад тяжелых кварков в первый момент спиновой структурной функции. С учетом зависимости от кварковых масс вычислен вклад аксиальной аномалии в спиновую структурную функцию фотона и получены связанные с ним правила сумм.
3. Установлена зависимость аномального глюонного вклада от доли импульса глюона. Предложено ее теоретическое описание на основе обобщения понятия аксиальной аномалии для нелокального аксиального тока на световом конусе и реализация в виде схемы факторизации больших и малых расстояний.
4. Установлено, что для последовательного описания поперечной поляризации необходим учет кварк-глюонных корреляторов твиста 3. Получена факторизационная формула для расчета подобных эффектов. Показано, что истинным

массовым параметром, описывающим поперечную поляризацию, является масса поляризованного адрона. Получено точное правило сумм (так называемое правило сумм Ефремова-Лидера-Теряева) для валентных вкладов в спиновые структурные функции.

5. Предложен новый механизм генерации фазовых сдвигов, необходимых для возникновения одиночных асимметрий, за счет малых виртуальностей партонов в подпроцессах твиста 3. Вычислены одиночные асимметрии образования фотонов, дилептонов и глюонных струй, фрагментирующих в пионы, в кварк-глюонных подпроцессах твиста 3.
6. Доказана факторизация в процессах, включающих  $T$  - нечетные функции фрагментации твиста три. Вычислена поперечная поляризация гиперонов, образующихся при аннигиляции неполяризованных лептонов. Получено нулевое правило сумм (так называемое правило сумм Теряева-Шефера) для зависящих от поперечного импульса и  $T$ -нечетных функций фрагментации.

Апробация работы. Результаты, представленные в диссертации, докладывались на семинарах Лаборатории теоретической физики ОИЯИ, Центров теорфизики Марселя и Палезо, университетов Регенсбурга и Лондона, были представлены на Международных Симпозиумах (Блумингтон, 1994 г., Амстердам, 1996 г., Протвино, 1998 г.) и рабочих совещаниях (Протвино, 1984, 1988, 1992 гг, Дубна, 1997, 2001 гг, Прага, 2002 г.) по Спиновым явлениям в физике высоких энергий, рабочих совещаниях по спиновым эффектам на ускорителе HERA (Цойтен, 1995, 1997 гг. Гамбург, 1999 г.), Международных совещаниях по глубоконеупругому рассеянию и КХД (Цойтен. 1999г., Краков, 2002 г.). Цикл статей, включающий эти исследования, был удостоен первой премии ОИЯИ за 1991 год.

Публикации. По материалам диссертации опубликована 41 работа.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Она содержит 155 страниц машинописного текста, 17 рисунков. Список литературы включает 155 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проведенного в диссертации исследования. Представлен современный статус и основные направления исследований спиновой структуры нуклона. Сформулирована цель работы и изложено ее краткое содержание.

В первой главе рассматривается факторизация сечений жестких поляризационных процессов в приближении ведущего твиста и роль, которую при этом играет глюонная аксиальная аномалия.

В разделе 1.1 рассмотрена КХД факторизация для кваркового вклада в жесткий процесс с участием как продольно, так и поперечно поляризованных адронов. Доказательство факторизационной формулы проводится в координатном представлении в пренебрежении всеми глюонными и кварк-глюонными операторами :

$$d\sigma = \int d\xi d\eta \langle P_B, S | N_\mu (\bar{\psi}_\alpha(\xi_1) \exp(i g \int_{\eta_1}^{\xi_1} \hat{A} \cdot dz) \psi_\beta(\eta_1)) | P_B, S \rangle$$

$$\langle P_A | \bar{\psi}(\xi_2) \gamma^\rho \dots \psi(\eta_2) | P_B \rangle \langle P_C | \dots \gamma^\sigma \dots | P_C \rangle E_{\sigma\rho}^{\alpha\beta}(\xi, \eta, \mu). \quad (1)$$

Вводя зависящие ( $C_T$ ) и не зависящие ( $f$ ) от спина функции распределения, моменты которых связаны с матричными элементами операторов, и используя уравнения движения КХД, можно



преобразовать (1) к партонному виду

$$d\sigma = \int d\beta f(\beta) Sp[(\beta\hat{P} + m)(1 + \hat{S}\gamma^5 \frac{C_T(\beta)}{f(\beta)})]E(\beta P), \quad (2)$$

представляющему свертку коэффициентной функции  $E$  с эффективной спиновой матрицей плотности кварка.

В разделе 1.2 эта формула обобщена на случай вклада глюонов в приближении старшего твиста (при продольной поляризации нуклона), когда матрицы плотности кварков и глюонов принимают вид:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\lambda}{2\pi} e^{i\lambda x} \left[ \begin{array}{l} \langle P, s | \bar{\psi}_\alpha(0) \psi_\beta(\lambda n) | P, s \rangle_{P,s} \\ \langle P, s | A_\rho(0) A_\sigma(\lambda n) | P, s \rangle_{P,s} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{l} q(x) \hat{P}_{\alpha\beta} + \xi \Delta q(x) (P\gamma^5)_{\alpha\beta} \\ \frac{g(x)}{x} d_{\rho\sigma} + i\xi \frac{\Delta g(x)}{x} \epsilon_{\rho\sigma Pn} \end{array} \right] \quad (3)$$

где  $d_{\rho\sigma} = g_{\rho\sigma} - n_\rho p_\sigma - n_\sigma p_\rho$ ,  $\epsilon_{\rho\sigma pn} \equiv \epsilon_{\rho\sigma\alpha\beta} p^\alpha n^\beta$ ,  $(nA) = 0$ ,  $p^2 = n^2 = 0$ ,  $(pn) = 1$ , и  $\xi$  – степень продольной поляризации адрона. Рассматриваются правила сумм, связывающие спиновые распределения кварков  $\Delta q$  и глюонов  $\Delta g$  с низкоэнергетическими характеристиками нуклона. При этом можно использовать два сохраняющихся оператора – тензор углового момента и кварк-глюонный ток, определяемый глюонной аксиальной аномалией. С учетом только кварковых степеней свободы и в пренебрежении орбитальным моментом эти два оператора пропорциональны друг другу. При выходе за рамки этого приближения тензор углового момента включает орбитальную часть, описывающуюся нелокальным оператором и не проявляющуюся поэтому в инклюзивных жестких процессах. В то же время матричный элемент аномального кварк-глюонного тока пропорционален комбинации первых моментов кваркового и глюонного спиновозависимых распределений

$$-\langle \tilde{j}_5^n \rangle_{P,s} = \Delta q + \frac{\alpha_s}{2\pi} \Delta g. \quad (4)$$

Именно эта величина предлагается в качестве меры поляризации кварков в нуклоне.

В разделе 1.3 рассматривается ее эволюция при изменении шкалы  $Q^2$ , определяющей характерный масштаб, на котором измеряются поляризации кварков и глюонов. Показано, что логарифмический рост  $\Delta g$  компенсирует такое же убывание  $\alpha_s$ , так что аномальный глюонный вклад является, по сути, эффектом ведущего приближения. Это означает сильное смешивание кварков и глюонов. Показано, что аксиальная аномалия проявляется лишь в случае легких кварков, а для тяжелых сокращается с "нормальным", массовым вкладом в дивергенцию. Сокращение происходит с точностью до членов  $\sim 1/M_Q^2$ , приводящих к малому ( $\sim 10^{-5}$ ) вкладу очарованных кварков в спин протона.

Раздел 1.4 посвящен анализу  $x$ -зависимости аномального глюонного вклада на основе обобщения понятия аксиальной аномалии на случай нелокальных операторов. Показано, что аномалия, определяемая как отличие дивергенции нелокального аксиального тока от её значения в классической теории поля, связана не только с малыми, но и со светоподобными расстояниями. Это приводит к нелокальному аномальному вкладу простого вида, определяемому коэффициентной функцией

$$K(x) = -\frac{\alpha_s}{\pi} N_f (1-x), \quad (5)$$

которая позволяет определить свободное от аномалии кварковое распределение.

$$\Delta\Sigma(x, Q^2) = \Delta\tilde{\Sigma}(x, Q^2) - K(x) \otimes \Delta g(x, Q^2), \quad (6)$$

Таким образом определяется конечное ренормгрупповое преобразование, соответствующее так называемой JET-схеме факторизации.

В разделе 1.5 вклад аксиальной аномалии рассмотрен для случая фотонной мишени. Это приводит к следующему правилу

сумм для аномального фотонного вклада в фотонную спиновую структурную функцию в несинглетном канале  $g_1^{\gamma NS}$  :

$$\int_0^1 g_1^{\gamma}(x) dx = -N_C \frac{\langle e^4 \rangle}{2} \cdot \frac{\alpha}{2\pi}. \quad (7)$$

при условии, что виртуальность или поперечный импульс фотона - мишени превышает массу кварка (которая, с учетом эффектов адронизации, должна быть заменена на массу пиона). В противном случае правая часть правила сумм должна обратиться в нуль за счет сокращения нормальной и аномальной дивергенции.

В связи с важной ролью аксиальной аномалии в жестких спиновых процессах в разделе 1.6 рассмотрена ее физическая интерпретация. Дисперсионный подход к аномалии, в котором она появляется просто как конечное вычитание, обобщен на случай виртуальных внешних фотонов (глюонов). Исследован принцип согласования Тхуфта в этом случае. Рассматривается также полуклассическая интерпретация аномалии, использующая равенство, с точностью до знака, аномального вклада в дивергенцию нормальному в пределе бесконечно тяжелого кварка. Этот последний вклад и вычисляется полуклассически.

Глава 2 посвящена исследованию кварк-глюонных корреляторов твиста 3 в случае простейшего жесткого процесса – глубоконеупругого рассеяния (ГНР) на поперечно поляризованном нуклоне. В разделе 2.1 анализируются качественные особенности жестких процессов с участием поперечно поляризованных частиц. Подчеркивается, что вследствие интерференции различных спиральных амплитуд асимметрии пропорциональны массовому параметру, порядок которого должен определяться массой поперечно поляризованного нуклона. В случае, когда он является единственной поляризованной частицей, необходим также фазовый сдвиг между интерферирующими амплитудами, отсутствующий при использовании наивной партонной модели в Борновском приближении.

В разделе 2.2 эффекты твиста 3 рассмотрены для простейшего случая скалярного глюона. Показано, что, с учетом уравнений движения, его влияние в ГНР сводится к одновременным:

- а) эффективной перенормировке токовой массы кварка,
- б) восстановлению калибровочно инвариантной формы адронного тензора.

Раздел 2.3, центральный в этой главе, посвящен анализу произвольного жесткого процесса с участием поляризованного нуклона в КХД. В результате получена простая факторизационная формула, в которой сечение произвольного жесткого процесса с участием поперечно поляризованного нуклона выражается, помимо спинового кваркового распределения  $C_T$ , через два кварк-глюонных коррелятора  $B_A$  и  $B_V$ .

В разделе 2.4 рассматриваются ограничения для корреляторов, следующие из Т-инвариантности (что приводит к симметрии  $B_A(x_1, x_2)$  и антисимметрии  $B_V(x_1, x_2)$  по своим аргументам), а также из калибровочной (обеспечиваемой уравнениями движения КХД) и Лоренц-инвариантности. В результате получены правила сумм, связывающие корреляторы с кварковыми распределениями.

$$\int dy [B^A(x, y) - iB^V(x, y)] = xC_T(x). \quad (8)$$

Раздел 2.5 посвящен применению общей факторизационной схемы к ГНР. Получены явные выражения для спиновых структурных функций  $g_1$  и  $g_2$ . Полученные в разделе 2.4 правила сумм приводят, в частности, к следующему соотношению для валентных вкладов каждого кваркового аромата в эти функции:

$$\int_0^1 dx x (g_1^{val}(x) + 2g_2^{val}(x)) = 0. \quad (9)$$

В разделе 2.6 правила сумм для спиновых структурных функций рассмотрены в области малых  $Q^2$ . В то время как для

структурной функции  $g_2$  упругий вклад в правило сумм Буркхардта - Коттингэма представляет источник сильной  $Q^2$  - зависимости, структура  $g_T = g_1 + g_2$  меняется плавно. Это предположение позволяет качественно описать поведение обобщенного правила сумм Герасимова - Дрелла - Хирна при малых  $Q^2$ .

В разделе 2.7 рассмотрен еще один класс ограничений для различных спиновых распределений и структурных функций, а именно следующих из положительной определенности матрицы плотности. Показано, что их совместимость с  $Q^2$ -эволюцией в ведущем приближении обеспечивается кинетической интерпретацией уравнений эволюции. Доказана справедливость неравенства Соффера для кирально-нечетного кваркового распределения при учете  $Q^2$ -эволюции. Получены также новые ограничения для распределения продольно поляризованных (скалярных) глюонов в нуклоне и вкладов отдельных кварковых ароматов в структурную функцию  $g_T$ .

Глава 3 посвящена специфике одиночных спиновых асимметрий, когда все частицы, кроме одной, поперечно поляризованы, являются неполяризованными. Эти величины относятся к Т-нечетным, хотя они и связаны не с истинным нарушением инвариантности относительно обращения времени, а с симулирующим его взаимодействием в конечном или начальном состоянии, приводящем к фазовым сдвигам.

В разделе 3.1 рассматриваются различные возможности возникновения таких фазовых сдвигов в подпроцессах твиста три. При этом мнимая часть у амплитуды может возникать за счет полюса в кварковом пропагаторе, когда обращается в нуль доля импульса кварка (фермионный полюс) или глюона (глюонный полюс).

В разделе 3.2 вычисляются вклады фермионных полюсов в одиночные право-левые асимметрии инклюзивных пионов, образующихся в фотон-нуклонных и нуклон-нуклонных столкновениях. Показано, что асимметрия пионов, образовавшихся при фрагментации кварковой струи, существенно больше, чем при

фрагментации глюонов. Это, наряду с правилами сумм для корреляторов, объясняет зеркальные асимметрии положительных и отрицательных пионов

В разделе 3.3 рассмотрены  $T$ -нечетные функции фрагментации, в которых фазовые сдвиги возникают на непертурбативной стадии фрагментации. Доказана факторизационная формула для таких функций твиста 3 и вычислен их вклад в поперечную поляризацию барионов, образованных в аннигиляции неполяризованных электронов и позитронов. Получены правила сумм для  $T$ -нечетных функций фрагментации твиста 2 и 3.

Раздел 3.4 посвящен еще одной возможности генерации односторонних асимметрий –  $T$ -нечетным фрактурным функциям. Фрактурные функции объединяют функции распределения и фрагментации и описывают коррелированную фрагментацию начальных адронов в партоны и конечные адроны. Показано, что такие величины имеют естественные  $T$ -нечетные аналоги, дающие вклад в полуинклюзивное ГНР.

Глава 4 имеет более прикладной характер и посвящена использованию спиновых эффектов в процессах с образованием дилептонов для исследования различных аспектов глюонной структуры адронов.

В разделе 4.1 рассматривается образование дилептонов с большим поперечным импульсом при рассеянии (квази)реальных фотонов на поперечно поляризованных нуклонах. При этом виртуальность дилептона является дополнительной переменной, позволяющей исследовать кварк-глюонные корреляторы при различных значениях их аргументов.

Раздел 4.2 посвящен исследованию асимметрии при образовании дилептонов, с малым (и усредненным) поперечным импульсом - в процессе Дрелла-Яна. Такая возможность возникает, если нет усреднения по углам вылета лептонов в системе их центра масс. Речь, таким образом, идет о корреляции поперечной поляризации нуклона и тензорной поляризации виртуального фотона. При расчете используется эффективная (по-

сколькx необходимый фазовый сдвиг возникает в кварк-глюонном подпроцессе) T-нечетная функция распределения.

Использование тензорной поляризации позволяет рассмотреть одиночные асимметрии и при продольной поляризации нуклона. В разделе 4.2 подобная асимметрия вычислена для дилептона, образованного при распаде  $J/\Psi$ -частицы в лептон-нуклонных и нуклон-нуклонных процессах. Поскольку жестким подпроцессом является фотон-глюонное или глюон-глюонное слияние, эта асимметрия является чувствительным пробником для поляризации глюонов в нуклоне, обсуждавшейся в главе 1.

В разделе 4.4 подобная асимметрия вычислена для образования дилептонов при рассеянии пионного пучка на продольно поляризованной нуклонной мишени. Главное внимание уделяется вкладу твиста четыре, когда пион описывается амплитудой распределения на световом конусе. Мнимая часть амплитуды, как и в случае фермионных и глюонных полюсов (раздел 3.1), возникает за счет полюса в кварковом пропагаторе, связанного в данном случае с "разрешением" пионной амплитуды посредством одноглюонного обмена. Ответ пропорционален пионной амплитуде  $\phi(\tilde{x})$  при значении аргумента, равном

$$\tilde{x} = \frac{x_L + \sqrt{x_L^2 + 4Q^2(1 + Q_T^2/Q^2)}/s}{2(1 + Q_T^2/Q^2)}, \quad (10)$$

и определяемом виртуальностью  $Q$ , продольным ( $\sim x_L$ ) и поперечным  $Q_T$  импульсом дилептона. Это делает данный процесс весьма привлекательным для исследования структуры пионов в КХД.

В заключении дана сводка основных результатов, полученных в диссертации.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. A. V. Efremov and O. V. Teryaev, Spin Structure Of The

- Nucleon And Triangle Anomaly, JINR-E2-88-287. Published in Czech.Hadron Symp.1988:302
2. А.В. Ефремов и О.В. Теряев, О спиновых эффектах в квантовой хромодинамике, ЯФ **36**, 242 (1982).
  3. А.В. Ефремов и О.В. Теряев, Поперечная поляризация в квантовой хромодинамике, ЯФ **39**, 1517 (1984).
  4. A.V.Efremov, J.Soffer, O.V.Teryaev, Spin Structure Of Nucleon And The Axial Anomaly, Nucl.Phys. **B346**, (1990) 97.
  5. O. V. Teryaev, The Relation Between Anomalous Magnetic Moment And Axial Anomaly, Phys. Lett. B **265**, 185 (1991).
  6. M. V. Polyakov, A. Schafer and O. V. Teryaev, The intrinsic charm contribution to the proton spin, Phys. Rev. D **60**, 051502 (1999).
  7. A. V. Belitsky and O. V. Teryaev, Singlet Axial Constant From QCD Sum Rules, Phys. Lett. B **366**, 345 (1996).
  8. A.V. Efremov and O.V. Teryaev, Axial Anomaly And Sum Rules For Photon Spin Structure Function, SPIN-89, in Proc. of III Serpukhov International Workshop, p. 77-81.
  9. D. Muller and O. V. Teryaev, Non-local generalization of the axial anomaly and x-dependence of the anomalous gluon contribution, Phys. Rev. D **56**, 2607 (1997).
  10. А.В. Ефремов и О.В. Теряев, О ренормировке аксиальной аномалии, ЯФ **51** (1990) 1492.
  11. A. V. Efremov and O. V. Teryaev, Axial Anomaly And Sum Rule For Photon Spin Structure Function, Phys. Lett. B **240**, 200 (1990).



12. J. Horejsi and O. Teryaev, Dispersive approach to the axial anomaly, the t'Hooft's principle and QCD sum rules, *Z. Phys. C* **65**, 691 (1995).
13. O. V. Teryaev, On The Semiclassical Interpretation Of Axial Anomaly, *Mod. Phys. Lett. A* **6**, 2323 (1991).
14. А.В. Ефремов и О.В. Теряев, Поляризационные процессы в квантовой хромодинамике, Труды Международного семинара по спиновым явлениям в физике высоких энергий, Дубна, 1981, с. 53-64.
15. O. V. Teryaev, Twist-3 effects for initial and final states, In *SPIN-96 Proceedings*. Edited by C.W. de Jager, T.J. Ketel, P.J. Mulders, J.E. Oberski, M. Oskam-Tamboezer. World Scientific, 1997, p. 594-598.
16. Efremov A.V., Teryaev O.V., New Sum Rules For Polarized Deep Inelastic Scattering, *Phys. Lett.* **200**, 363 (1988).
17. O.V. Teryaev, On The Single And Double Twist-3 Asymmetries, Prepared for 11th International Symposium on High-energy Spin Physics and the 8th International Symposium on Polarization Phenomena in Nuclear Physics (SPIN 94), Bloomington, Indiana, 15-22 Sep 1994. In "Bloomington 1994, High energy spin physics", p. 467-471.
18. A. V. Efremov, O. V. Teryaev and E. Leader, An exact sum rule for transversely polarized DIS, *Phys. Rev. D* **55**, 4307 (1997).
19. O.V. Teryaev, Twist-3 in Proton Nucleon Single Spin Asymmetries, Prepared for Workshop on the Prospects of Spin Physics at HERA, Zeuthen, Germany, 28-31 Aug 1995. Published in *Proceedings, Prospects of spin physics at HERA, Hamburg, DESY-95-200*, pp. 132-142 e-Print Archive: hep-ph/0102296

20. J. Soffer and O. V. Teryaev, Gluon polarization in transversely polarized nucleons and jet spin asymmetries at RHIC, Phys. Rev. D **56**, 1353 (1997).
21. J. Soffer and O. Teryaev, The Role of  $G_2$  in relating the Schwinger and Gerasimov-Drell-Hearn sum rules, Phys. Rev. Lett. **70**, (1993) 3373.
22. J. Soffer and O. V. Teryaev, On the  $G_2$  manifestation for longitudinally polarized particles," Phys. Rev. D **51**, 25 (1995)
23. A. Efremov and O. Teryaev, QCD Asymmetry And Polarized Hadron Structure Functions, Phys. Lett. **B150**, (1985) 383.
24. J. Soffer and O. Teryaev, Comment on the Burkhardt-Cottingham and generalized Gerasimov-Drell-Hearn sum rules for the neutron, Phys. Rev. **D56**, 7458 (1997).
25. J. Soffer and O. V. Teryaev, Bjorken sum rule at low  $Q^2$ , Phys. Lett. B **545**, 323 (2002)
26. C. Bourrely, J. Soffer and O. V. Teryaev, The  $Q^2$  evolution of Soffer inequality, Phys. Lett. B **420**, 375 (1998)
27. C. Bourrely, E. Leader and O. V. Teryaev, Positivity of NLO spin-dependent parton distributions, Dubna SPIN-97 Proceedings, p. 83-88, arXiv:hep-ph/9803238.
28. O. V. Teryaev, Positivity Constraints For Parton Distributions In QCD, Nucl. Phys. Proc. Suppl. **79**, 557 (1999).
29. J. Soffer and O. V. Teryaev, Positivity constraints and flavor dependence of higher twists, Phys. Lett. B **490**, 106 (2000)
30. J. Soffer and O. V. Teryaev, A positivity bound for the longitudinal gluon distribution in a nucleon, Phys. Lett. B **419**, 400 (1998)

31. N. Hammon, O. Teryaev and A. Schafer, Single spin asymmetry for the Drell-Yan process, Phys. Lett. B **390**, 409 (1997).
32. D. Boer, P. J. Mulders and O. V. Teryaev, Single spin asymmetries from a gluonic background in the Drell-Yan process, Phys. Rev. D **57**, 3057 (1998).
33. A. Efremov, V. Korotkiian and O. Teryaev, The twist - three single spin asymmetries of pion production, Phys. Lett. B **348**, 577 (1995).
34. A. Schafer and O. V. Teryaev, Sum rules for the T-odd fragmentation functions, Phys. Rev. D **61**, 077903 (2000)
35. O. V. Teryaev, T Odd Effects In QCD, RIKEN Rev. **28**, 101 (2000)
36. O. V. Teryaev, Spin-dependent, interference and T-odd fragmentation and fracture functions, Acta Phys. Polon. B **33**, 3749 (2002)
37. V. M. Korotkiian and O. V. Teryaev, Compton Twist - Three Subprocesses For P P Single Spin Asymmetries, Phys. Rev. D **52**, 4775 (1995).
38. D. Kazakov, F. Renzoni, O. Teryaev, A. Tkabladze, The Single Spin Asymmetry In Hadronic J / Psi Production, In \*Zeuthen 1995, Proceedings, Possible measurements of singly polarized  $p\vec{p}$  and  $p\vec{n}$  collisions at HERA . Hamburg DESY - Int.Rep.Zeuthen-95-05 (95/12,rec.Jan.96) p, 43-49.
39. A. Brandenburg, D. Muller and O. V. Teryaev, Extraction of the pion distribution amplitude from polarized muon pair production, Phys. Rev. D **53**, 6180 (1996).
40. M. Diehl, T. Gousset, B. Pire and O. Teryaev, Probing partonic structure in  $\gamma^* \gamma \rightarrow \pi \pi$  near threshold, Phys. Rev. Lett. **81**, 1782 (1998).

41. B. Pire and O. V. Teryaev, Single spin asymmetries in  $\gamma^*\gamma \rightarrow \pi\pi\pi$  at large  $Q^2$ , Phys. Lett. B **496**, 76 (2000).

Получено 16 апреля 2003 г.

*Макет Н. А. Киселевой*

Подписано в печать 18.04.2003.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,15. Тираж 100 экз. Заказ № 53862.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@pds.jinr.ru](mailto:publish@pds.jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)