

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

ЕСАЙБЕГЯН

СЕРГЕЙ ВАГАНОВИЧ

ГЛУБОКО НЕУПРУГИЕ И УПРУГИЕ ПРОЦЕССЫ
В МОДЕЛЯХ С КАЛИБРОВОЧНЫМИ ПОЛЯМИ

(01.04.02 - теоретическая и математическая физика)

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Ереван - 1979

Работа выполнена в Ереванском физическом институте

Научный руководитель - доктор физико-математических наук, профессор С.Г.МАТИНЯН

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, А.И.Вайнштейн (ИЯФ СО АН СССР)
кандидат физико-математических наук Ю.П.Малакян (ИФМ АН Арм.ССР)

Ведущая организация - Институт физики высоких энергий (Серпухов)

Защита диссертации состоится " 12 " и ю н я 1979г. на заседании специализированного Совета Д 034.01.03 по присуждению ученых степеней доктора физико-математических наук при Ереванском физическом институте (375036, Ереван-36, ул.Маркаряна, 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕФИ.

Автореферат разослан " 3 " мая 1979г.

Ученый секретарь
специализированного Совета
кандидат физ.-мат. наук

 В.А.ШАХБАЗЯН

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Развитие физики элементарных частиц за последние годы привело к появлению ряда новых теоретических схем, описывающих слабые, электромагнитные и сильные взаимодействия. Все эти схемы основываются на калибровочных группах, взаимодействии обусловлено обменом мультиплетом янг-миллсовских полей. Среди этих схем выделяются модель сильных взаимодействий, основанная на группе $SU_c(3)$ - квантовая хромодинамика, и "стандартная" схема, объединяющая слабые и электромагнитные взаимодействия (модель Вайнберга-Салама), являющиеся, по-видимому, реальными кандидатами на роль теорий, описывающих сильные, электромагнитные и слабые взаимодействия соответственно.

Несомненный интерес поэтому представляет исследование следствий, вытекающих из этих моделей. Рассмотрение упругого и неупругого рассеяния лептонов на нуклонах интересно в свете вышесказанного с той точки зрения, что в пределе больших передач квадрата четырехимпульса прощупывается структура нуклона и тем самым изучается поведение теории на малых расстояниях. В этой области еще не решенные проблемы, связанные с нашим незнанием поведения теории на больших расстояниях, становятся несущественными, и, делая правдоподобные предположения (модель Бродского, Фаррар, Джексона) относительно поведения волновых функций, описывающих связанное состояние нуклона, можно получить конкретные предсказания на поведение форм-факторов, структурных функций, величин, связанных с наличием

P -нечетных взаимодействий.

Цели и задачи работы состоят в следующем:

I. Рассмотрение возможности того, что в качестве составляющих адрона выступают заряженные бесструктурные векторные частицы.

II. Изучение поведения структурных функций барионов в общем случае n -кваркового связанного состояния в пределе $x = \frac{Q^2}{2P_1} \rightarrow 1$, рассмотрение зависимости этих функций от поляризации начальной частицы.

III. Вывод соотношения между структурными функциями с учетом нарушения $SU(3)$ -симметрии за счет разности масс $(m)S$ -странного и u -протонного кварков.

IV. Изучение асимптотического поведения барионных формфакторов. Получение асимптотических соотношений для электромагнитных и слабых формфакторов нуклонов. Исследование асимптотического поведения формфакторов $N \rightarrow \Delta$ перехода.

V. Анализ поляризационных эффектов, обусловленных слабым нейтральным током в рамках модели Вайнберга-Салама, с учетом результатов, полученных в данной работе при исследовании поведения нуклонов в пределе больших передач четырехимпульса:

а) в упругом электрон-нуклонном и электрон-дейтронном рассеянии;

б) в инклюзивной e^+e^- -аннигиляции;

в) в электро- и нейтрино рождении изобары.

Научная новизна и значимость проведенной работы

Показано, что структурные функции в наивной модели партонов со спином единица существенно нарушают скейлинг, что, по-видимому, является дополнительным аргументом в пользу общепринятой кварковой структуры нуклона.

В кварк-глюонной модели исследованы дополнительные следствия на поведение структурных функций барионов в области $x \rightarrow 1$ для общего случая n -кваркового связанного состояния. Получены соотношения между структурными функциями $\sqrt{W_2}$ октета барионов в зависимости от масс кварков. Показано, как изменяется поведение $\sqrt{W_2}$ в зависимости от поляризации начальной частицы. Оценен средний поперечный импульс кварка с $x=1$.

Развит ковариантный формализм расчета электромагнитных и слабых формфакторов в кварковой модели в области больших передач квадрата 4-импульса Q^2 . Предсказано изменение знака нуклонных формфакторов, нарушение "скейлингового" закона для электромагнитных формфакторов, зануление изоскалярного вклада в асимптотике. Найдены соотношения между формфакторами $N \rightarrow N$ и $N \rightarrow \Delta$ переходов.

Полученные результаты, примененные для оценок P -нечетных эффектов в упругом eN рассеянии, приводят к заключению о независимости последних от рода нуклонной мишени. Показано, что исследование P -нечетных эффектов в упругом e^+d -рассеянии может дать важную информацию о величине изоскалярного вклада в слабый нейтральный ток. Найдено, что рассмотрение поляризационных эффектов в инклюзивной e^+e^-

аннигиляции и e^- и ν рождении изобары в свете полученных результатов может дать новую дополнительную информацию как о верности кварк-глюонной модели, так и о справедливости модели Вайнберга-Салама.

Практическая полезность

Экспериментальная проверка некоторых из полученных результатов может оказаться критичной не только к рассмотренным моделям, но и к квантовой хромодинамике в целом. Так, экспериментальное исследование поведения формфакторов в пределе больших Q^2 (смена знаков электромагнитных формфакторов; отклонение от "скейлингового" закона), предсказываемого в диссертации, может оказаться одним из важных тестов квантовой хромодинамики. Зануление изоскалярного вклада в асимптотике может (наряду с отношением M_p/M_n) оказаться тестом гипотезы нерелятивистского движения кварков в адроне.

Полученные ограничения на поведение структурных функций, применимы для нахождения вероятности обнаружить невалентный кварк в адроне при $x \rightarrow 1$. Эти результаты применимы также к легким ядрам, которые в области больших передач импульсов можно рассматривать состоящими из соответствующего числа кварков.

Оценки, полученные в работе, на параметры чувствительные к эффектам нейтральных токов, могут быть проверены в планируемых экспериментах на машинах PEP и PETRA.

Апробация работы

Результаты, полученные в диссертации, докладывались на

научных сессиях Отделения ядерной физики АН СССР (1975; 1978 г.г.), на конференциях молодых ученых ЕРФИ (1975, 1977 г.г.), на теоретических семинарах Ереванского физического института и представлялись на ХУШ и XIX Международные конференции по физике высоких энергий (Тбилиси, 1976, Токио, 1978).

Публикации. По теме диссертации опубликовано шесть статей.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 116 страниц машинописного текста, 4 таблицы, 18 рисунков. Список цитируемой литературы включает 119 наименований.

II. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обсуждаются актуальность вопросов, затронутых в работе, формулируется задача исследования и приводится краткое описание основного содержания диссертации.

В первой главе, носящей в основном обзорный характер (за исключением §16), рассмотрены модели сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий. В §1 обсуждаются экспериментальные данные по глубоко неупругому e^-N взаимодействию, их связь с наивной партонной моделью, с гипотезой масштабной инвариантности. В §16 рассмотрена возможность, что в качестве составляющих адрона выступают заряженные точечные векторные частицы. Показано, что структурные функции (W_1 , $\sqrt{W_2}$) глубокого электророждения не имеют скейлингового поведения в беркеновском пределе $q^2 = -Q^2$, $\nu \rightarrow \infty$, ω фиксировано (q^2 - квадрат 4-импульса, $M\nu = Pq$; $\omega = \frac{1}{x} = -\frac{2M\nu}{q^2}$, P, M - 4-импульс, масса начального нуклона

соответственно)

$$W_1(q^2, \nu) = \frac{1}{3M} \left(1 - \frac{q^2}{4m_v^2}\right) \sum_N P_N \sum_{i=1}^N Q_i^2 f_i^N \left(\frac{1}{\omega}\right) \quad (I)$$

$$\nu W_2(q^2, \nu) = \left(1 - \frac{q^2}{6m_v^2}\right) \frac{1}{\omega} \sum_N P_N \sum_{i=1}^N Q_i^2 f_i^N \left(\frac{1}{\omega}\right)$$

Здесь m_v - масса векторного партона, P_N - вероятность конфигурации из N партонов в адроне, $f_i^N(x)$ - распределение по x продольного импульса протона у i -го партона.

Нарушение скейлинга, предсказываемое в (I), по-видимому, исключается последними экспериментальными данными. Таким образом, рассмотрение показывает, что партоны спина $1/2$ доминируют в структуре нуклона. Гипотеза партоны-кварки рассмотрена в §Iв, в деталях обсуждается ограничение, которое следует из этой гипотезы для поведения отношения $\frac{\nu W_2}{\nu W_1}$ при $x \rightarrow 1$. Дан обзор теории калибровочных полей; модели, описывающей поведение теории на малых расстояниях (модель Бродского, Фаррар, Джексона (БФД)), стандартной схемы, Вайнберга-Салама, объединяющей электромагнитные и слабые взаимодействия.

Вторая глава диссертации посвящается изучению дальнейших следствий модели БФД. В ней исследуется поведение структурных функций адронов при $x \rightarrow 1$. Мы исходим из предположения, что мезоны и барионы - S волновые связанные состояния соответственно кварка-антикварка и трех кварков. Кварки несут конечные доли импульса начального адрона, их поперечные импульсы и инвариантные массы ограничены. Рассмотрение ведется в нековариантной теории возмущений, что, на наш взгляд, облегчает отбор главных членов, а также анализ

спиновых свойств структурных функций в интересующей нас области $1 \gg 1-x \gg m^2/Q^2$.

В §I подробно проанализированы кинематика и свойства вершин в системе центра инерции $\vec{p} + \vec{q} = 0$ $|\vec{p}|$ - импульс адрона. Показано, что все вершины $f^{S_1, S_2} = \bar{u}^{S_2}(p_2) \hat{e}^{\lambda} u^{S_1}(p_1)$ (S_1, S_2, λ - спиральности начального, конечного кварков и глюона соответственно) можно расклассифицировать следующим образом. "Хорошая" вершина $\sim 1/\sqrt{1-x}$ - импульс одного из кварков в вершине мал, глюон поперечный, продольный глюон приводит к "нехорошей" вершине $\sim m$. Если импульсы обоих кварков в вершине велики, то вершины в случае поперечной поляризации глюона "нехорошие", а в случае продольной - "хорошие". Показано, что должны доминировать диаграммы упорядоченные по времени так, что импульс передается снизу вверх и слева направо (если ось времени направлена слева направо). Так, в случае $n=3$ (n - число кварков в нуклоне) "выживает" только диаграмма рис. I

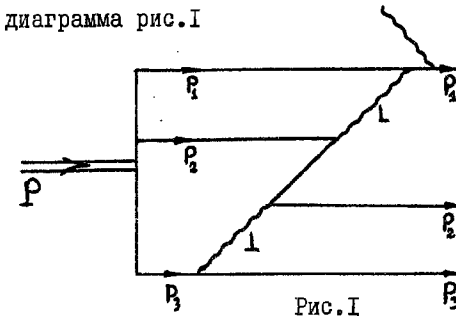


Рис. I

Эти результаты обобщены в §2 на случай n -кваркового связанного состояния. Для нечетного n для поперечной части структурной функции $\nu W_2^T = F_1$ получаем:

$$F_L(x) \sim (1-x)^{2n-3} \quad (2)$$

Продольная часть подавлена как $\frac{m^2}{Q^2}$. Если спиральность λ начальной частицы $|\lambda| \neq \frac{1}{2}$, то структурная функция подавлена по сравнению с (2) как $(1-x)^{2|\lambda|-1}$. При четном n во всех диаграммах имеется одна "нехорошая" вершина и для поперечного фотона получаем

$$F_L(x) \sim (1-x)^{2n-2} \quad (3)$$

Спиральности $(n-2)$ кварков взаимно противоположны, поэтому структурные функции для случая спиральности начальной частицы $|\lambda| \geq 2$ подавлены по сравнению с (3) как $(1-x)^{2|\lambda|-2}$

Для продольного фотона структурная функция в скейлинговом пределе обращается в нуль, однако в области $\frac{m^2}{Q^2} \ll 1-x \sim (\frac{m^2}{Q^2})^{1/2}$ оказывается сравнимой со случаем поперечной поляризации.

$$F_L(x) \sim \frac{m^2}{Q^2} (1-x)^{2n-4} \quad (4)$$

Все начальные спиральности кварков в этом случае попарно противоположны и (4) верно только для нулевой спиральности начальной частицы. В противном случае возникает дополнительное подавление вида $(1-x)^{2|\lambda|}$.

Подробно исследуется неабелевый случай, показано, что все эти результаты имеют место и в случае учета четырех и трех глюонных вершин. В §3 проанализированы соотношения между структурными функциями октета барионов в зависимости от масс кварков. При получении результатов, дополнительно предполагается, что кварки можно считать связанными нерелятивистски. Расчет диаграммы рис.1 приводит к заключению,

D

что для Λ и Σ гиперонов оба эффекта нарушения $SU(6)$ симметрии (спиновое и за счет разности масс кварков) работают в одну сторону и при $x \rightarrow 1$ доминирует вклад странного кварка. В случае Σ гиперонов два эти эффекта работают в разные стороны, и вероятности найти странный и нестранный кварк при $x \rightarrow 1$ оказываются сравнимыми. Оценивается средний поперечный импульс кварка с $x \sim 1$ при равных массах $\langle k_{\perp}^2 \rangle = 6m^2$, при $m_s/m_u = 1,5$ $\langle k_{\perp}^2 \rangle = 18m^2$, причем инвариантная масса второго и третьего кварка при $m_2 = m_3 \sim 1,1(\Gamma_{36})^2$ при $x \rightarrow 1$.

Третья глава диссертации посвящена вопросу определения асимптотического поведения формфакторов в кварк-глюонной модели. В §1 предположение, что кварки в нуклоне и изобаре связаны нерелятивистски, позволяет записать в общем виде вершины перехода трех кварков в адрон и в изобару и разработать соответствующую ковариантную диаграммную технику счета электромагнитных и слабых формфакторов. В §2 приведен детальный расчет магнитного G_M и электрического G_E формфакторов нуклона. (A - общий коэффициент больший нуля), α_s - эффективная константа взаимодействия кварков с глюонами).

$$G_M^p(Q^2) = -3A \frac{(2M)^4}{Q^4} (4\pi\alpha_s)^2; G_E^p(Q^2) = -8A \frac{(2M)^4}{Q^4} (4\pi\alpha_s)^2 \quad (5)$$

$$G_M^n(Q^2) = -G_M^p(Q^2); G_E^n(Q^2) = 12A \frac{(2M)^4}{Q^4} (4\pi\alpha_s)^2$$

Анализируется предел малых Q^2 , показано, что разработанная диаграммная техника приводит к правильным соотношениям между электромагнитными формфакторами в пределе $Q^2 \rightarrow 0$. Показано, что смена знаков нуклонных формфакторов не зависит от природы глюонов и имеет место также для скалярного и псевдоскалярного

глюонов, в отличие от случая π -мезона, где формфактор при $Q^2 \rightarrow \infty$ оказывается положительным для векторного глюона и отрицательным для скалярного и псевдоскалярного глюонов.

Экспериментальное обнаружение смены знаков нуклонных формфакторов при $Q^2 \rightarrow \infty$ было бы сильным аргументом в пользу векторного глюона, если пионный формфактор останется в этом пределе положительным. Найдены соотношения между слабыми формфакторами аксиальным g_A и векторным g_V . Предсказывается равенство в асимптотике $g_V = g_A$, являющееся следствием δ_S -инвариантности теории. В §3 проанализировано асимптотическое поведение формфакторов перехода $\gamma^* N \rightarrow \Delta$. Найдено соотношение G_M^* - магнитно дипольного, G_E^* - электрически квадрупольного, G_C^* - кулоновского формфакторов с формфакторами $\gamma^* N \rightarrow N$

$$\frac{G_M^*(Q^2)}{G_E^*(Q^2)} = -\frac{G_E^*(Q^2)}{G_E^*(Q^2)} = -\frac{\sqrt{3}}{8} \quad \frac{G_C^*(Q^2)}{G_E^*(Q^2)} = \frac{1}{Q^2} \quad (6)$$

В отличие от случая нуклонных формфакторов G_M^* не меняет знака в асимптотике.

В главе IV работы проанализированы P-нечетные эффекты, обусловленные слабым нейтральным током (СНТ), в свете результатов, полученных в II и III главах. В §I рассмотрены упругое e^-N - и e^-D -рассеяние. Конкретное знание поведения формфакторов в асимптотике (5) приводит к заключению, что параметр асимметрии A

$$A = \frac{|M_R^{\delta+2^0}|^2 - |M_L^{\delta+2^0}|^2}{|M_R^{\delta+2^0}|^2 + |M_L^{\delta+2^0}|^2}$$

($M_{R(L)}$) - амплитуда соответствующая правым (левым) электронам) в пределе больших Q^2 имеет одинаковую величину при рассеянии на протоне и нейтроне, в отличие от предела малых Q^2 , такой же результат получаем в упругом e^-D рассеянии в кинематической области, соответствующей квазиупругому пучку. Показано, что упругое e^-D рассеяние может дать важную информацию о величине изоскалярного вклада в СНТ. Результаты главы II использованы при анализе эффектов СНТ в инклюзивной e^+e^- -аннигиляции в §2. Показано, что поляризационные свойства, обусловленные СНТ, в случае $\Sigma^- \Xi^-$ -гиперонов не зависят от структуры адрона в кварк-глюонной модели в случае измерения параметров асимметрии A и асимметрии "вперед-назад" N. Полученные ограничения на поведение структурных функций позволяют рассчитать величины асимметрии A и N и средней спиральности P в модели Вайнберга-Салама. В случаях Λ и Ξ^0 -гиперонов P \approx 30%, а величины A и N (табл.3,4 диссертации) достигают 15-20% при начальной энергии электронного пучка E = 15 ГэВ. В §3 рассмотрены поляризационные эффекты СНТ, приводящие к рождению изобары в лептон-нуклонном рассеянии. Показано, что изменение углового распределения \star -мезонов при такой постановке эксперимента, когда детектируется также продольно-поляризованный нуклон распада, может дать полезную дополнительную информацию о справедливости модели Вайнберга-Салама. Равенство аксиального и векторного формфакторов изобары, являющееся следствием γ_5 -инвариантности теории, при $Q^2 \rightarrow \infty$ позволяет оценить величину средней спиральности нуклона распада $P_N^{(e)} \sim 1\%$ при $Q^2 \sim 10^2 (\frac{1.6}{c})^2$; $P_{V(\bar{v})} \approx \mp 100\%$.

Проводится сравнение предсказаний со случаем заряженных слабых токов.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

I. Рассмотрена ортодоскальная модель партонов, в которой заряженные составляющие адронов имеют спин единицу. Показано, что структурные функции существенным образом нарушают скейлинг. Последние экспериментальные данные по нарушению скейлинга исключают, по-видимому, возможность какой-либо значительной примеси векторных партонов в структуре нуклона.

II. В кварк-глюонной модели получены предсказания на поведение структурных функций при $x \rightarrow 1$ для общего случая n -кваркового связанного состояния: $F(x) \simeq (1-x)^{2n-3}$ для нечетного n и $F(x) \simeq (1-x)^{2n-2} + m^2/Q^2 (1-x)^{2n-4}$ для четного n . Для поляризационных состояний исследуется зависимость структурных функций от поляризации начальной частицы.

III. Получены соотношения между структурными функциями октета барионов в зависимости от масс кварков. Предсказывается доминирование вклада странного кварка в структурную функцию Λ - и Σ^0 -гиперона при $x \rightarrow 1$. Оценен средний поперечный импульс кварка с $x \sim 1$.

IV. Детально проанализировано поведение формфакторов $\gamma^* N \rightarrow N$ и $\gamma^* N \rightarrow \Delta$ в асимптотической области больших Q^2 . Предсказывается смена знаков нуклонных формфакторов,

зачленение изоскалярного вклада, сильное нарушение "масштабного" закона для формфакторов $G_M^P/G_E^P = -G_M^N/G_E^P = \frac{3}{8}$; $G_E^N/G_E^P = -\frac{3}{2}$

V. Найдено асимптотическое поведение формфакторов G_2, G_2, G_3 , описывающих переход $\gamma^* N \rightarrow \Delta$. Приведены соотношения между формфакторами $\gamma^* N \rightarrow N$ и $\gamma^* N \rightarrow \Delta$. Проанализировано соотношение между аксиальными и векторными формфакторами нуклона и изобары. Показано, что в пределе больших Q^2 они совпадают $g_A = g_V$; $F_2^A \simeq \Delta G_3(Q^2)$ $\delta = M + M_\Delta$.

VI. Рассмотрены эффекты нейтральных токов в e^+N, e^-D рассеянии, $e^+e^- \rightarrow B + X$ -аннигиляции, в лептон нуклонном рождении изобары. Показано, что измерение величин, чувствительных к наличию P -нечетных взаимодействий, может дать полезную дополнительную информацию как о верности рассмотренной кварк-глюонной модели, так и в модели Вайнберга-Салама. Приведены оценки на эти величины.

IV. ПУБЛИКАЦИИ

По материалам диссертации опубликовано 6 работ

1. С.В.Есаян, С.Г.Матинян. Векторные партоны? "Письма в ЖЭТФ", 1974, т.19, вып.6, с.418-420.
2. С.Г.Григорян, С.В.Есаян, Н.Л.Тер-Исаакян. О поведении структурных функций адронов при $X \rightarrow 1$. "ЯФ", 1978, т.27, вып.5, с.1312-1322.
3. On the asymptotics of baryon form factors in quark-gluon model preprint EFI342(67)-78 List of authors: I.G.Aznauryan, S.V.Esayan, K.Z.Natsagortsyan, N.L.Ter-Isaakyan
4. С.В.Есаян. Поляризационные эффекты в электрон дейтронном рассеянии при наличии слабого нейтрального тока. Изв.АН Арм.ССР, Физика, 1977, т.12, с.3-10.
5. С.Г.Григорян, С.В.Есаян, Н.Л.Тер-Исаакян. Поляризационные эффекты обусловленные слабым нейтральным током в инклюзивной e^+e^- -аннигиляции. Научное сообщение ЕФИ 278 (3)-78.
6. С.В.Есаян, С.Г.Матинян. Поляризационные явления при рождении изобары слабым нейтральным током. "ЯФ", 1977, т.25, вып.1, с.170-176.

Тех. редактор А.С.Абрамян

Заказ 120

ВФ _06376

Тираж 160

Издано отделом научно-технической информации Ереванского
физического института, Ереван-36, пер. Маркарян 2