

Ф - 33

2-80-642

ФЕДОРЕНКО
Олег Михайлович

ЭФФЕКТЫ ВЫСШИХ ПОРЯДКОВ
ЭЛЕКТРОСЛАБОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
В ПРОЦЕССАХ
ГЛУБОКОНЕУПРУГОГО РАССЕЯНИЯ
ЛЕПТОНОВ АДРОНАМИ

Специальность 01.04.02. – теоретическая
и математическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1980

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук

Д. Ю. БАРДИН

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
профессор

М. П. РЕКАЛО

кандидат физико-математических наук

В. С. ЗАМИРАЛОВ

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Физический институт Академии наук СССР им. П. Н. Лебедева, Москва

Автореферат разослан " " _____ 1980 года.

Защита диссертации состоится " " _____ 1980 года на заседании Специализированного совета К047.01.01 Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований (Московская обл., г. Дубна).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

В. И. ЖУРАВЛЕВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

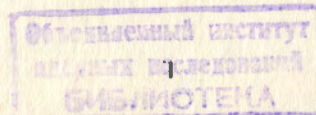
Процессы глубоконеупругого взаимодействия лептонов с адронами имеют исключительно важное значение в физике микромира. Точечный характер лептонов и локальность электрослабых взаимодействий позволяют в этих процессах при больших передаваемых q^2 выявить релятивистскую полевую природу структуры адронов.

При этом важным моментом для правильной интерпретации экспериментальных данных является учет радиационных поправок. В связи с последним возникает нетривиальная задача сравнения экспериментальных данных с детальными расчетами квантовой теории поля, в которых приходится учитывать вклады высших диаграмм.

С появлением единой теории электрослабых взаимодействий^{/1,2/} круг процессов, для которых радиационные поправки могут быть вычислены надежно, значительно расширился и, в частности, включает теперь процессы с участием нейтрино.

В связи с проводимыми в настоящее время нейтринными и мюонными экспериментами ЦЕРН^{/3-5/} и планируемыми экспериментами в ФНАЛ^{/6/} по глубоконеупругому рассеянию при энергии лептонного пучка 500-800 ГэВ, расчеты радиационных поправок в этой области энергий являются весьма актуальными.

Цель работы состоит в изучении эффектов высших порядков электрослабого взаимодействия в глубоконеупругих лептон-адронных процессах рассеяния при энергиях, характерных для проводимых и планируемых экспериментов.



Научная новизна и практическая ценность

В диссертации проведена перенормировка однопетлевой амплитуды упругого рассеяния двух любых фермионов со спином $1/2$. Амплитуда вычислена в рамках $SU(2)_L \times U(1)$ калибровочной теории Вайнберга-Салама с произвольным числом левых фермионных дублетов и представлена в унифицированном виде, позволяющем легко распространить проведенные вычисления на другие калибровочные схемы.

Вычисления конечных вкладов всех однопетлевых диаграмм получены с использованием единственного приближения, когда инварианты амплитуды $I = S, t, u$ намного больше квадратов масс фермионов. Это позволяет работать в области сверхвысоких энергий, где сравнимы вклады слабого и электромагнитного взаимодействий.

На основе найденного выражения для амплитуды в рамках кварк-партоновой модели адрона впервые рассчитаны радиационные поправки к процессам глубоконеупругого рассеяния нейтрино (антинейтрино) на нуклонах в широкой области кинематических переменных.

Вычислены радиационные поправки к P -нечетным асимметриям A^{\pm} , B в глубоконеупругом мюон-нуклонном рассеянии в диапазоне энергий пучка мюонов: десятки ГэВ – десятки ТэВ. Показано, что радиационный эффект уменьшает асимметрии по абсолютной величине.

Предложено в качестве исходного параметра теории использовать параметр $\sin^2 \Theta_w$, извлекаемый из экспериментов по нейтральным токам в нейтринных реакциях при низких энергиях и экспериментов по P -нечетным асимметриям A^{\pm} , а отношение констант $\frac{g_F^2}{M_W^2}$ определять из μ -распада.

Практическая ценность состоит в применении полученных в диссертации результатов к анализу физической информации из данных мюонного эксперимента $NA4$ /4/ групп Болонья – ЦЕРН – Дубна – Мюнхен – Сакле.

Апробация диссертации

Основные материалы диссертации неоднократно докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории теоретической физики, Лаборатории ядерных проблем, Лаборатории высоких энергий ОИЯИ, на сессии ОЯФ АН СССР (Москва, 1979), в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН, Швейцария, 1980), на Совещаниях групп международного эксперимента $NA4$ (Дубна, 1978–1980) и на Международном совещании по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике (Дубна, 1979).

Публикации

По результатам диссертации опубликовано девять статей.

Объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения, содержит 84 страницы машинописного текста, 14 рисунков и библиографический список литературы из 104 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается краткий обзор развития калибровочных теорий электрослабых взаимодействий. Обсуждается важность изучения эффектов высших порядков в процессах взаимодействия элементарных частиц. Обосновывается интерес к вопросам, рассматриваемым в работе. Перечислены проблемы, исследуемые в диссертации, и показана их актуальность.

В первой главе диссертации выполнена ренормализационная процедура для однопетлевого приближения амплитуды рассеяния двух любых фермионов со спином $1/2$ в рамках теории Вайнберга-Салама с произвольным числом левых фермионных дублетов. Схема перенормировок основана на методе лагранжиана контрчленов. Вычисления однопетлевых диаграмм проведены в рамках техники размерной регуляризации в унитарной калибровке.

В качестве исходных параметров, при проведении ренормализационной процедуры, выбраны: заряд электрона – e , слабая константа – g , масса заряженного векторного W^{\pm} -бозона – M_W , массы всех фермионов – M_f и масса скаляра Хиггса – M_H .

В первом параграфе предложено физическую слабую константу g_F определять из полного времени жизни мюона τ_{μ}

$$\frac{1}{\tau_{\mu}} = \frac{g_F^4 m_{\mu}^5}{3 \cdot 2^4 \pi^3 M_W^4} \left[1 + \frac{d}{g} (F - G_{IR}) \right] = \frac{g_F^4 m_{\mu}^5}{32^4 \pi^3 M_W^4} \quad (I)$$

где F – константа, обусловленная однопетлевыми диаграммами с обменом векторными и скалярными частицами, G_{IR} – инфракрасный вклад, возникающий от перенормировки на массовой поверхности W -бозона. Соотношение (I) накладывает одно ограничение на три неизвестных на сегодняшний день из эксперимента параметра – g , M_W и M_H и фиксирует отношение g_F^2 / M_W^2 в перенормированных амплиту-

дах (для заряда электрона сохраняется условие $e^2 = 4\pi d$). В качестве оставшихся свободных параметров используем $\sin^2 \theta_w^F = e^2/g_F^2$ и M_X (массы всех фермионов M_f фиксируем из эксперимента).

Установлено, что зависимость от M_X мала. Например, при $1 \text{ ГэВ} \leq M_X \leq 100 \text{ ГэВ}$ относительное изменение однопетлевых поправок не превышает 1%. Последний параметр — $\sin^2 \theta_w^F$ определяем из эксперимента.

Показано, что вычисления в схеме перенормировок, где $\sin^2 \theta_w^F$ определен из соотношения (1) и физической массы W -бозона, приводят к большим радиационным эффектам в кинематической области эксперимента Станфордской группы^{/7/}. Найдено, что этот эффект почти полностью обусловлен константным членом, происходящим от диаграмм $Z\gamma$ -смешивания (член $\sim \ln \frac{M_W}{m_e}$). Естественно включить этот член в определение параметра, извлекаемого из опыта, потребовав, чтобы уже выполненный анализ эксперимента^{/7/} не менялся в зависимости от учета радиационных поправок, что можно достигнуть, если положить

$$\sin^2 \theta_w^{\text{ex}} = \sin^2 \theta_w^F \cdot \left[1 + \frac{d}{2\pi} \cdot F(\sin^2 \theta_w^F) \right], \quad (2)$$

где $F(\sin^2 \theta_w^F)$ — низкоэнергетический предел диаграмм $Z\gamma$ -смешивания.

Далее показано, что фиксация параметров (1) и (2) предсказывает величину массы W -бозона с учетом радиационных эффектов

$$M_W = \frac{37.3}{\sin \theta_w^{\text{ex}}} \cdot \left[1 + \frac{d}{2\pi} \cdot F(\sin^2 \theta_w^{\text{ex}}) \right]. \quad (3)$$

При $\sin^2 \theta_w^{\text{ex}} = 0.23$ второе слагаемое $\sim +0.04$, т.е. радиационные эффекты увеличивают массу W -бозона с 77,8 ГэВ до 80,8 ГэВ.

Во втором и третьем параграфах получена свободная от расходимостей амплитуда упругого рассеяния двух произвольных фермионов в t -канале за счет обмена векторными Z - и W -бозонами.

В четвертом параграфе обсуждается сокращение расходимостей.

В пятом параграфе подведены итоги проведенного исследования.

Во второй главе вычислены радиационные поправки $\delta^{\nu, \bar{\nu}}$ к процессам глубокоупругого рассеяния нейтрино и антинейтрино на нуклонах индуцированным заряженными токами.

В первом параграфе дана схема расчета инклюзивного сечения глубокоупругого $\nu(\bar{\nu})N$ -рассеяния в однопетлевом приближении модели Вайнберга-Салама и кварк-партоновой модели.

Во втором параграфе вычислен вклад в поправку диаграмм с обменом виртуальными частицами (V -вклад). Показано, что результирующая поправка $\delta^{\nu, \bar{\nu}}$ не зависит от части параметров теории Вайнберга-Салама: от M_X и от $\sin^2 \theta_w^F$. Более того, она не зависит и от выбора калибровочной модели, объединяющей слабые и электромагнитные взаимодействия. Отмечено, что аналогичное утверждение справедливо и для μ -распада.

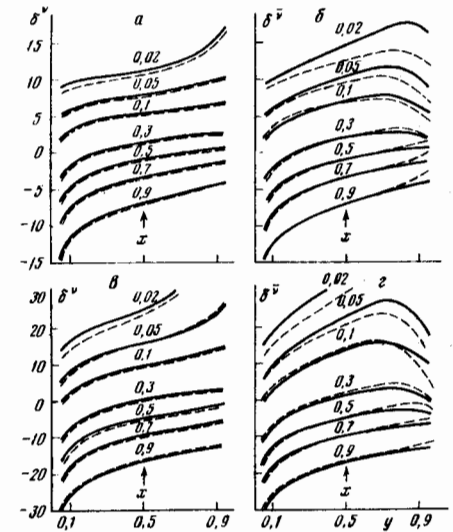
В третьем параграфе получен вклад в электромагнитную поправку $\delta^{\nu, \bar{\nu}}$ диаграмм тормозного излучения (R -вклад). Все громоздкие расчеты (шпурирование, интегрирование по полному фазовому объему фотонов) были выполнены с помощью системы аналитических вычислений SCHONSCHIP /8/.

В четвертом параграфе обсуждаются результаты численных расчетов поправки $\delta^{\nu, \bar{\nu}}$ для процессов глубокоупругого рассеяния нейтрино (антинейтрино) на изоскалярной мишени при энергии 100 ГэВ (см. рис. 1).

Рис. 1.

Электромагнитные поправки ($\delta^{\nu, \bar{\nu}}$, %) при энергии нейтрино 100 ГэВ, вычисленные с партоновыми распределениями из работ /12/ (сплошные линии) и /13/ (пунктирные линии), для процессов:

ν_μ — (а), $\bar{\nu}_\mu$ — (б),
 ν_e — (в), $\bar{\nu}_e$ — (г).



Результаты вычислений сравниваются с расчетами работ^{9,10/}, выполненными в V-A теории, и недавней работы^{11/}, где при вычислении однопетлевых диаграмм сохранены старшие степени логарифмов. Сравнение показывает, что результаты работ^{9,10/} согласуются с нашими результатами лишь в общих чертах. Величина и поведение поправки $\delta^{V,V}$, вычисленной в работе^{11/}, совпадает с нашими результатами.

Пятый параграф содержит краткие выводы.

Третья и четвертая главы диссертации посвящены изучению радиационных эффектов к P-нечетным асимметриям в рамках модели Вайнберга-Салама и кварк-партоновой модели.

В третьей главе вычислены радиационные поправки к P-нечетным асимметриям $A^{\bar{F}}$ и зарядовой асимметрии B в глубоконеупругом рассеянии поляризованных мюонов на нуклонах в интервале энергий эксперимента $NA4$ ^{14/} (50-280 ГэВ).

В первом параграфе проводится расчет инклюзивного сечения $d^2\Sigma_i^{\bar{F}}(\lambda)$ процессов

$$l^{\bar{F}} + N \rightarrow l^{\bar{F}} + \text{адроны} \quad (4)$$

с поляризованным (λ - продольная поляризация) начальным лептоном в порядке α^3 и в приближении

$$M_f \ll I \ll M_w \quad (5)$$

Получено однопетлевое приближение для асимметрий $A^{\bar{F}}$ и B

$$\lambda \cdot A^{\bar{F}} = [d^2\Sigma_i^{\bar{F}}(\lambda) - d^2\Sigma_i^{\bar{F}}(-\lambda)] / [d^2\Sigma_i^{\bar{F}}(\lambda) + d^2\Sigma_i^{\bar{F}}(-\lambda)], \quad (6)$$

$$B_i(\lambda) = [d^2\Sigma_i^+(\lambda) - d^2\Sigma_i^-(\lambda)] / [d^2\Sigma_i^+(\lambda) + d^2\Sigma_i^-(\lambda)]. \quad (7)$$

Во втором параграфе проводится детальное обсуждение результатов. Показано, что радиационные поправки к $A^{\bar{F}}$ - порядка 2% при $E = 280$ ГэВ и малых скейлинговых y , но быстро растут с увеличением y . При $y = 0,9$ и переданном 4-импульсе $q^2 = 100$ ГэВ² поправки к $A^+(A^-)$ составляют ~ 15% (10%). При $y > 0,9$ и малых q^2 радиационные поправки достигают десятков процентов, что связано с механизмом излучения жестких фотонов. Радиационный эффект к B изображен на рис. 2.

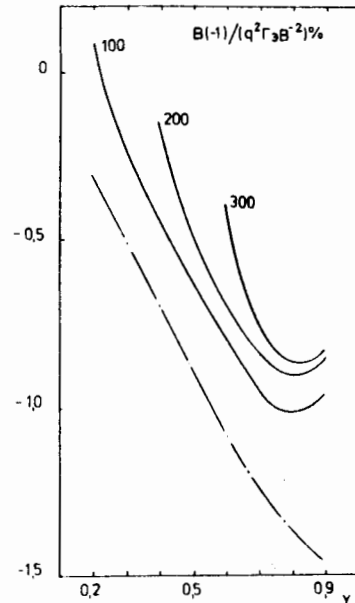


Рис. 2.

Асимметрии $B_i(-1)$ при $\sin^2 \theta_w^{ex} = 0,23$, энергии мюонов 280 ГэВ и $q^2 = 100, 200$ и 300 ГэВ². Штрих-пунктиром показана борновская асимметрия B_0 .

В четвертой главе вычислены радиационные поправки к P-нечетным асимметриям $A^{\bar{F}}$ и B в области сверхвысоких энергий.

В первом параграфе обсуждается инвариантное инклюзивное сечение lN -рассеяния в приближении $M_f^2 \ll I$. Показано, что радиационный эффект в асимметриях можно хорошо аппроксимировать, учитывая лишь часть диаграмм: вершинные электромагнитные поправки к лептонному току, поляризацию вакуума фермионами, включая диаграммы $Z\gamma$ -смешивания и диаграммы тормозного излучения лептоном.

Во втором параграфе обсуждаются результаты. Показано, что в области $E=500-800$ ГэВ наиболее велика поправка к асимметрии B , где она достигает многих десятков процентов, менее выражены поправки к $A^{\bar{F}}$, не превосходящие 10% в большей части кинематической области. На рис. 3 представлены численные результаты для асимметрий $A^{\bar{F}}$ в глубоконеупругом рассеянии продольно поляризованных мюонов на изоскалярном нуклоне при $\sin^2 \theta_w^{ex} = 0,23$, $q^2 = 100, 500$ и 900 ГэВ², $E = 800$ ГэВ с использованием партоновых спектров работы^{13/} ($\bar{A}^{\bar{F}}$ - асимметрии, вычисленные по части диаграмм).

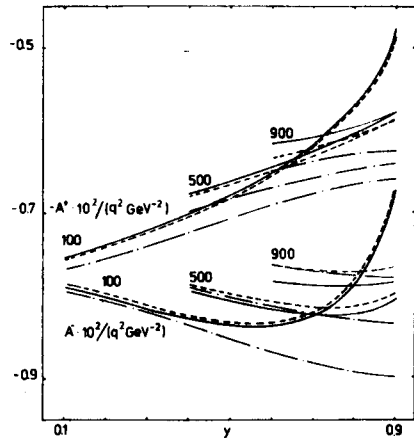


Рис. 3.
Асимметрии A^- и $-A^+$.
 A_1 - сплошные линии,
 \bar{A}_1 - пунктирные, A_0 -
штрих-пунктирные.

Проводятся также численные расчеты радиационных эффектов к асимметриям A^\mp и B при энергии $E = 30$ ТэВ.

В третьем параграфе подведены итоги проведенного исследования.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертации.

В приложении приведен лагранжиан Вайнберга в унитарной калибровке.

Основные результаты диссертации, выдвигаемые для защиты:

1. В калибровочной теории типа Вайнберга-Салама с произвольным числом левых фермионных дублетов вычислена однопетлевая амплитуда процесса рассеяния двух фермионов со спином $1/2$ в приближении $M_t^2 \ll 1$.

2. Рассчитаны радиационные поправки к процессам глубоконеупругого рассеяния нейтрино (антинейтрино) на нуклонах при энергиях, типичных для современных ускорителей.

3. Проанализирована зависимость радиационной поправки в глубоконеупругом $\nu(\bar{\nu})N$ -рассеянии от энергии пучка нейтрино. Показано, что поправку можно считать не зависящей от энергии в пределах ширины нейтринного спектра.

4. Установлено, что поправки к $\bar{\nu}N$ -рассеянию в области малых x уменьшаются с ростом y .

5. Найдена зависимость поправки от выбора параметризаций для партонных спектров в нейтринных реакциях. Показано, что чувствительность к выбору функций распределения партонов особенно выражена при малых скейлинговых x .

6. Вычислены радиационные поправки к P -нечетным асимметриям A^\mp и B в глубоконеупругом мюон-нуклонном рассеянии в широком диапазоне энергий.

7. Исследована чувствительность поправки к асимметриям от выбора параметров модели. Установлено, что варьирование массы скаляра Хиггса в пределах от 1 ГэВ до 100 ГэВ, массы кварка в пределах от 0,3 ГэВ до 1 ГэВ приводит к относительному изменению асимметрий, не превышающему 1%.

8. Показано, что радиационные эффекты уменьшают асимметрии по абсолютной величине.

9. Предложено фиксировать параметр $\sin^2 \theta_w$ из анализа экспериментов по нейтральным токам в нейтринных реакциях при низких энергиях и экспериментов по P -нечетным асимметриям, отношение констант G_F^2/M_W^2 определять из полного времени жизни мюона.

Результаты диссертации опубликованы в работах:

Д.Ю.Бардин, О.М.Федоренко. Об эффектах высших порядков для процессов упругого рассеяния фермионов в теории Вайнберга-Салама. - I. Схема перенормировок. - Дубна, 1978. - 24 с. (Сообщение ОИЯИ: P2-II413).

Д.Ю.Бардин, О.М.Федоренко. Об эффектах высших порядков для процессов упругого рассеяния фермионов в теории Вайнберга-Салама. - II. Вычисление однопетлевых диаграмм. - Дубна, 1978. - 30 с. (Сообщение ОИЯИ: P2-II414).

Д.Ю.Бардин, О.М.Федоренко. Однопетлевое приближение амплитуды процесса $\nu q \rightarrow \nu q$ в теории Вайнберга-Салама. - Дубна, 1978. - 18 с. (Сообщение ОИЯИ: P2-II461).

Д.Ю.Бардин, О.М.Федоренко. Оценка систематических неточностей, обусловленных радиационными поправками в опытах по глубоконеупругому νN -рассеянию. - ЯФ, 1979, т. 30, с. 811-823.

D.Yu.Bardin, O.M.Fedorenko, N.M.Shumeiko. On the Radiative Corrections to P-Odd Asymmetry in Deep-Inelastic Scattering of Polarized Leptons on Nucleons. - Dubna, 1979. - 8 p. (Preprint JINR: E2-12564).

А.А.Ахундов, Д.Ю.Бардин, О.М.Федоренко, Н.М.Шумейко. Применение аналитических вычислений на ЭВМ к расчету процессов тормозного излучения и образования пар. - Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применение в теоретической физике (Дубна, 1979). - Дубна, 1980. (ОИЯИ: ДИИ-80-13), с. 170-172.

Д.Ю.Бардин, О.М.Федоренко, Н.М.Шумейко. Радиационные поправки к P-нечетным асимметриям в глубоконеупругом рассеянии поляризованных лептонов и антилептонов на нуклонах. - ЯФ, 1980, т. 32, с. 782-795.

D.Yu.Bardin, P.Ch.Christova, O.M.Fedorenko. On the Lowest-Order Electroweak Corrections to Spin 1/2 Fermion Scattering. - I. The One-Loop Diagrammar. - Nucl.Phys., 1980, v. B 174, p.111-138.

D.Yu.Bardin, O.M.Fedorenko, N.M.Shumeiko. Radiative Corrections to P-Odd Asymmetries in Deep-Inelastic Scattering of Polarized Muons on Nucleons at TeV Energies. - Dubna, 1980. - 14 p. (Preprint JINR: E2-80-503).

Литература:

1. S.Weinberg. A model of Leptons. - Phys.Rev.Lett., 1967, v.19, p.1264-1266.
2. A.Salam. Weak and Electromagnetic Interaction. - In: Elementary Particle Physics. - Stockholm, 1968, p.367-377.
3. R.Cliff et al. Proposed Experiment and Equipment for a Programme of Muon Physics at the SFS. - Switzerland, 1974. - 217 p. (Preprint CERN: SPSC, 74-78, P.18).
4. F.Krienen et al. An Experiment to Extend the Inclusive Deep-Inelastic Muon Scattering of Hydrogen and Deuterium to the Highest Energies and Four-Momentum Transfers Available at the SFS. - Switzerland, 1974. - 18 p. (Preprint CERN: SPSC, 74-79, P. 19).
5. K.Tittel. Charged Current Interactions and Multilepton Production. - In: Proceeding of the 19th International Conference on High Energy Physics. - Tokyo, 1978, p.863-881.

6. R.R.Wilson. Fantasies of Future Fermilab Facilities. - Rev. Mod.Phys., 1979, v. 51, p. 259-274.
7. C.Y.Prescott et al. Parity Non-Conservation in Inelastic Electron Scattering. - Phys.Lett., 1978, v. 77 B, p.347-352.
8. H.Strubbe. Manual for SCHOONSCHIL. - Com.Phys.Com., 1974, v.8, p. 1-30.
9. J.Kiskis. Radiative Correction to Deep-Inelastic Neutrino-Nucleon Scattering. - Phys.Rev., 1973, v. D 8, p. 2129-2138.
10. R.Barlow, S.Wolfram. Electromagnetic Radiative Corrections to Deep-Inelastic Neutrino Interaction. - Phys.Rev., 1979, v. D 20, p.2198-2206.
11. A.De Rujula, R.Petronzio, A.Savoy-Navarro. Radiative Corrections to High-Energy Neutrino Scattering. - Nucl.Phys., 1979, v. B 154, p. 394-426.
12. J.Okada, S.Pakvasa, S.F.Tuan. Implications for Quark-Parton Distributions from Some Recent High-Energy Experiments. - Lett.Nuovo Cimento, 1976, v. 16, p. 555-561.
13. V.Barger, R.J.N.Phillips. Quark-Parton Model Relations in Deep-Inelastic Lepton Scattering. - Nucl.Phys., 1974, v. B 73, p. 269-294.

Рукопись поступила в издательский отдел
2 октября 1980 года.