

К-172

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

2-93-380

КАЛИНОВСКАЯ
Лидия Владимировна

УДК 530.145

**МОДЕЛЬНО-НЕЗАВИСИМЫЙ АНАЛИЗ
КЭД ПОПРАВOK ДЛЯ ГЛУБОКОНЕУПРУГОГО
ep-РАССЕЯНИЯ В НЕЙТРАЛЬНОМ ТОКЕ**

Специальность: 01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1993

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

Научные руководители:

кандидат физико – математических наук А.А.Ахундов

кандидат физико – математических наук Д.Ю.Бардин

Официальные оппоненты:

доктор физико – математических наук Н.П.Меренков

доктор физико – математических наук профессор Р.Н.Фаустов

Ведущее научно – исследовательское учреждение:

кафедра теоретической физики
Московского государственного университета
им.М.В.Ломоносова, Москва

Защита состоится " 1 " декабря 1993 г.
на заседании специализированного Совета Д-047.01.01 по адресу: 141980,
Дубна Московской обл., ЛТФ ОИЯИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " 1 " ноября 1993 г.

Ученый секретарь специализированного Совета
доктор физико – математических наук

А.Е.Дорохов

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Инклюзивное глубоконеупругое ep рассеяние имеет богатые возможности для изучения структуры адронов. По аналогии с тем, как с помощью α и β частиц изучалась структура атома, в современных экспериментах по рассеянию лептонов исследуется кварк – глюонная структура нуклонов.

В конце семидесятых начале восьмидесятых годов, мотивируясь нуждами эксперимента BCDMS, была написана серия работ, посвященных изучению радиационных процессов (0.1) и (0.2).

$$e(k_1) + p(p_1) \rightarrow e(k_2) + \gamma(k) + X(p_2), \quad (0.1)$$

и

$$e(k_1) + p(p_1) \rightarrow e(k_2) + \gamma(k) + p(p_2). \quad (0.2)$$

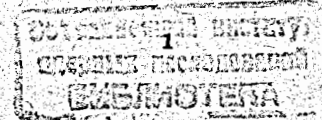
В этих работах, модельно – независимым способом вычислялись радиационные поправки для экспериментов по глубоконеупругому рассеянию на фиксированной мишени при энергиях значительно больших, чем в первых экспериментах SLAC.

В настоящее время значительно улучшилась методика экспериментов по изучению глубоконеупругого ep – рассеяния. Намного возросли энергии в системе центра масс. В экспериментах на фиксированной мишени был получен квадрат переданного импульса $Q^2 \sim 100 \text{ GeV}^2$ в CERN и $Q^2 \sim 500 \text{ GeV}^2$ в Fermilab.

В мае 1992 года на детекторах H1 и ZEUS начались эксперименты на ускорителе ГЕРА с энергиями $E_e \simeq 26.7 \text{ GeV}$, $E_p \simeq 820 \text{ GeV}$ и светимостью $\mathcal{L} = 1.6 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Эти эксперименты позволят изучить глубоконеупругие реакции в ранее недостижимой кинематической области квадратов переданных 4 – импульсов $Q^2 > M_Z^2$. В этой области сечения реакции с обменом фотоном могут сравняться с сечением реакции с обменом Z – бозоном.

Для теоретической поддержки экспериментов по глубоконеупругому ep – рассеянию на ускорителе ГЕРА возникла необходимость:

- я) провести новый анализ лептонных радиационных поправок (процессов (0.2) и (0.1) с обменом фотоном), дающих основной вклад в широком диапазоне Q^2 , при энергиях, типичных для ускорителя ГЕРА и в терминах новых экспериментально наблюдаемых переменных.



jj) учесть лептонные поправки, идущие от диаграмм с обменом Z – бозоном.

Эта задача может быть решена в рамках модельно – независимого подхода.

Проведенное исследование преследовало следующие цели:

- Вычислить дифференциальные угловые и энергетические распределения фотонов в процессе $ep \rightarrow e\gamma p(X)$ на ускорителе ГЕРА.
- Получить обобщенные формулы для учета вклада радиационного хвоста от упругого пика, с учетом обмена как γ – квантом так и Z – бозоном в измеряемое сечение глубоконеупругого $ep \rightarrow eX$ рассеяния при энергиях ускорителя ГЕРА.
- Провести аналитическое (не основанное на методе Монте – Карло и с малым числом остаточных численных интегрирований), полное (не использующее приближение с лидирующих логарифмов), модельно – независимое (не основанное на кварк – партонной модели) вычисление лептонных радиационных поправок к нейтральному току в глубоконеупругом ep – рассеянии в четырех кинематических переменных: лептонных, смешанных, адронных и Жакэ – Блонделя.
- Создать пакет программ на FORTRAN для расчета дифференциальных сечений процессов глубоконеупругого рассеяния в нейтральном токе с учетом радиационных эффектов при излучении фотона из лептонного тока при энергиях ГЕРА.

Научная новизна работы.

- Обнаружена большая чувствительность энергетических и угловых спектров фотонов в неупругой реакции к выбору структурных функций в диапазоне малых углов и больших энергий излученных фотонов.
- Получены обобщенные формулы для вклада радиационного хвоста от упругого пика в измеряемое сечение глубоконеупругого $ep \rightarrow eX$ рассеяния при энергиях ускорителя ГЕРА.

- Предложена простая процедура сглаживания подинтегральной функции, которая чрезвычайно эффективна при большой энергии и малой массе излученных частиц ($m^2/S \sim 10^{-12}$).
- Впервые выполнено частичное интегрирование пиков сечения в ультрарелятивистском приближении.
- Установлено, что вклад упругого радиационного хвоста при малых x существенен.
- Проведено полу – аналитическое, полное, модельно – независимое вычисление лептонных радиационных поправок к нейтральному току в глубоконеупругом ep – рассеянии для четырех наборов инвариантных переменных: лептонных, смешанных, адронных, Жакэ – Блонделя.
- Проведено вычисление сечений глубоконеупругого рассеяния с экспоненцированием мягкого фотонного излучения.
- Полный расчет в смешанных, адронных и переменных Жакэ – Блонделя выполнен впервые.
- Создан пакет программ на TERAD91 для расчета дифференциальных сечений процессов глубоконеупругого рассеяния в нейтральном токе с учетом радиационных эффектов при излучении фотона из лептонного тока при энергиях ГЕРА.

Практическая ценность работы.

Созданная программа TERAD91 для расчета радиационных эффектов в глубоконеупругом ep – рассеянии использовалась в эксперименте H1 при анализе данных по измерению протонной структурной функции $F_2(x, Q^2)$ в области $x = 10^{-2} - 10^{-4}$ и $Q^2 > 5\text{GeV}^2$ и полного сечения фоторождения $\gamma p \rightarrow X$ на ускорителе ГЕРА.

Следующие результаты выдвигаются для защиты:

1. Вывод лоренц-инвариантных формул для электромагнитных поправок низшего порядка в глубоконеупругом $ep \rightarrow eX$ рассеянии при энергиях ускорителя ГЕРА в различных кинематических переменных.
2. Результаты численных расчетов дифференциальных сечений с учетом диаграмм обмена γ - квантом и Z - бозоном при $S = 10^5 \text{ GeV}^2$ для $x \in [10^{-4}, 0.5]$ и $y \in (0, 1)$:
 - а) спектров фотонов в упругом и неупругом ep - рассеянии;
 - б) радиационного хвоста от упругого пика;
 - в) лептонной радиационной поправки к нейтральному току в глубоконеупругом ep - рассеянии в четырех кинематических переменных: лептонных, смешанных, адронных, Жакэ - Блонделя.
3. Исследование вопроса чувствительности электромагнитных поправок к выбору структурных функций в диапазоне малых углов и больших энергий излученных фотонов.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории Теоретической Физики им. Н.Н.Боголюбова ОИЯИ, на семинарах в Институте Физики Высоких Энергий в Цейтене (Германия), в ЦЕРНЕ (Швейцария), в ДЭЗИ (Гамбург, Германия), на Рабочем Совещании "Физика на ГЕРЕ" (29 - 30 Октября 1991г., Гамбург, Германия), на Рабочем Совещании "Глубоконеупругое рассеяние" 6 - 10 Апреля 1992г., Тойпитц, Германия).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано шесть статей.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа содержит 92 страницы, включая 33 рисунка, 4 таблицы и библиографический список литературы из 69 названий.

Содержание работы

Во введении очерчен круг исследуемых проблем, кратко сформулированы используемый метод и результаты, полученные в диссертации. Приведено содержание по главам.

В первой Главе диссертации вычислены энергетические и угловые распределения фотонов в процессах

$$e + p \rightarrow e + \gamma + p, \quad (0.3)$$

$$e + p \rightarrow e + \gamma + X. \quad (0.4)$$

Приведены численные результаты при $E_\gamma = 30 \text{ GeV}$ и $E_p = 820 \text{ GeV}$.

Чувствительность спектров для неупругой реакции (0.4) к выбору структурных функций проиллюстрирована на Рис.1, где мы вычислили фотонные распределения с двумя вариантами "скорректированных" структурных функций.

$$A_i(M_X^2, Q_h^2) \rightarrow A_i(M_X^2, Q_h^2)(1 - W_2^{el}(Q_h^2)), \quad (0.5)$$

или

$$A_i(M_X^2, Q_h^2) \rightarrow A_i(M_X^2, Q_h^2)(1 - \exp(-a^2 Q_h^2)), \quad (0.6)$$

где

$$W_2^{el}(Q_h^2) = \frac{G_e^2 + \tau G_m^2}{1 + \tau}, \quad \tau = \frac{Q_h^2}{4M^2} \quad (0.7)$$

а $a^2 = 3,37 \text{ GeV}^{-2}$.

Как видно из Рис.1, использование формул стандартной партонной модели с фитом для $f_q(x, Q^2)$ и $\bar{f}_q(x, Q^2)$ приводит к переоценке результата в диапазоне малых углов θ_γ и больших E_γ . Результаты отличаются примерно на 6 - 7 порядков по сравнению с результатами, полученными с реалистическими структурными функциями.

Последнее наблюдение имеет очень важное следствие. Диапазон малых углов θ_γ и больших E_γ соответствует диапазону малых x и больших y , где радиационные поправки очень велики (~ 100%).

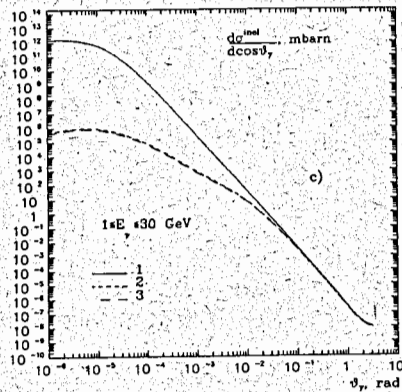
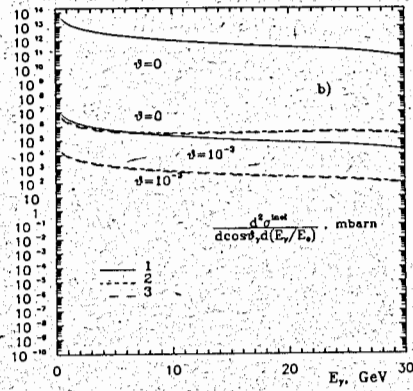
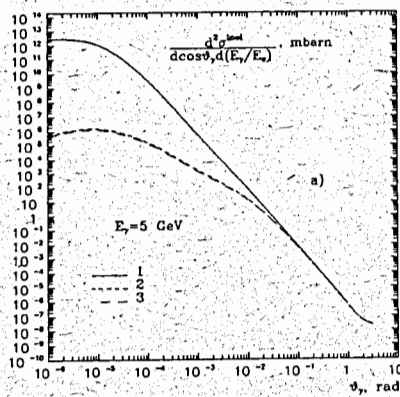


Рис. 1.а-1.с. Фотонные распределения в процессе $e\gamma \rightarrow e\gamma X$ при $E_e = 30\text{GeV}$, $E_\gamma = 820\text{GeV}$: а- и б- дважды дифференциальные сечения по θ , и E_γ ; с- распределения по θ , проинтегрированное по E_γ в пределах $1 \leq E_\gamma \leq 30\text{GeV}$. Числа рядом с кривыми указывают на различные фиты структурных функций (0.5)–(0.6).

Во второй Главе диссертации вычислено дважды дифференциальное сечение упругого рассеяния в реакции $e\gamma \rightarrow e\gamma\gamma$ при энергиях ускорителя ГЕРА.

Впервые выполнено частичное интегрирование пиков сечения в ультрарелятивистском приближении.

Результаты вычислений сечения инклюзивной реакции $e\gamma \rightarrow e\gamma\gamma$ при $S = 10^5\text{GeV}^2$ представлены на Рис.2.а.

Доминирующий вклад в сечения идет от диаграмм с обменом γ – квантом. Вклад от диаграмм с обменом Z – бозоном составляет меньше одного процента от величины полного сечения.

На Рис.2.б. представлено поведение отношения

$$\sigma^{ERT}(x,y) = \frac{d^2\sigma^{ERT}}{dx dy} / \frac{d^2\sigma^0}{dx dy}, \quad (0.8)$$

где $d^2\sigma^0/dx dy$ – Борновское сечение основной реакции (0.2), вычисленное в рамках кварк – партонной модели.

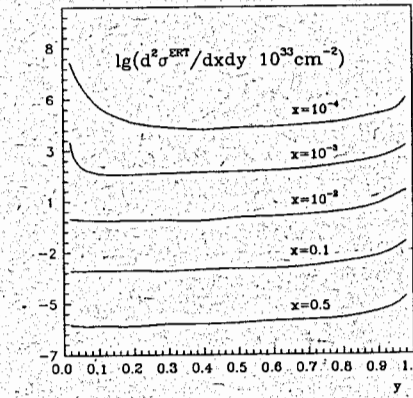


Рис. 2.а. Сечение реакции $e\gamma \rightarrow e\gamma\gamma$ при $S = 10^5\text{GeV}^2$.

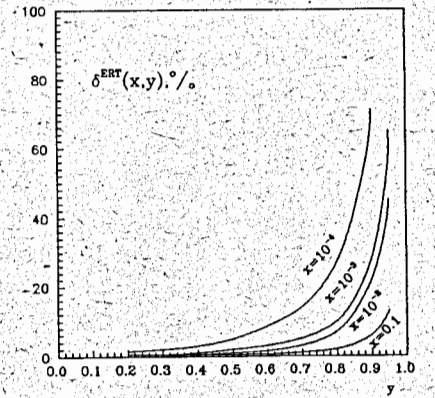


Рис. 2.б. ERT поправки к $e\gamma \rightarrow e\gamma X$ при $S = 10^5\text{GeV}^2$.

В третьей Главе диссертации вычислены дважды дифференциальные сечения лептонных радиационных процессов в нейтральном токе в глубоконеупругом рассеянии с учетом диаграмм с γ и Z - обменом

$$\frac{d^2\sigma}{d\varepsilon_1 d\varepsilon_2} \sim \frac{2\alpha^3}{\pi} \int dI_1 dI_2 \dots,$$

где $\mathcal{E} = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2\}$ набор двух переменных, в которых определяется величина $d^2\sigma$. В случае лептонных, смешанных и адронных переменных

$$\mathcal{E} = \{(Q_l^2, S_l), (Q_l^2, S_h), (Q_h^2, S_h)\}. \quad (0.9)$$

$\mathcal{I} = \{I_1, I_2\}$ - соответствующий набор переменных, по которому проводится интегрирование

$$\mathcal{I} = \{(S_h, Q_h^2), (S_l, Q_h^2), (S_l, Q_l^2)\}. \quad (0.10)$$

Проведены вычисления этих сечений с экспоненцированием мягкого фотонного излучения. Полный расчет в смешанных и адронных переменных выполнен впервые.

На Рис. 3.a, 3.b, 3.c показано поведение радиационного фактора δ как функции y с параметром x при энергиях ГЕРА $S = 98400 \text{ GeV}^2$ в случае лептонных, адронных и смешанных переменных.

Из рисунков видно, что наибольшая поправка соответствует лептонным переменным, и что поправки очень сильно зависят от выбора переменных. Их поведение и абсолютная величина сильно различаются в разных переменных.

Радиационные поправки с экспоненцированием мягких фотонов также представлены на этих рисунках (штриховая линия). Видно, что в большей части кинематического диапазона, экспоненцирование мягких фотонов практически не меняет величину поправки.

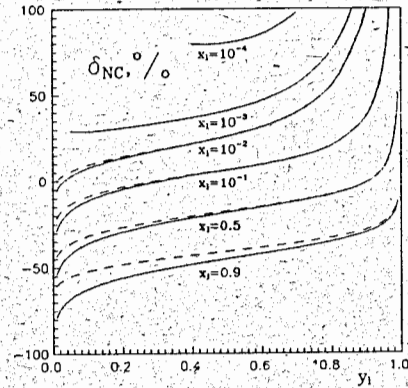


Рис. 3.a КЭД лептонные поправки к $d^2\sigma/dx_l dy_l$ в процентах. Сплошная линия: без экспоненцирования; штриховая: с экспоненцированием мягких фотонов.

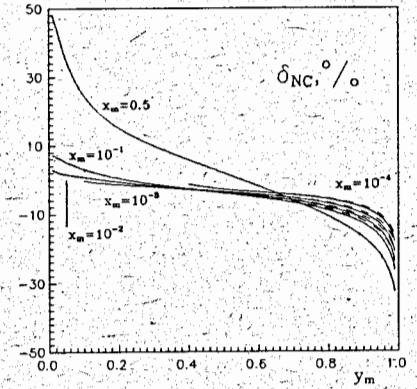


Рис. 3.b КЭД лептонные поправки к $d^2\sigma/dx_m dy_m$ в процентах. Сплошная линия: без экспоненцирования; штриховая: с экспоненцированием мягких фотонов.

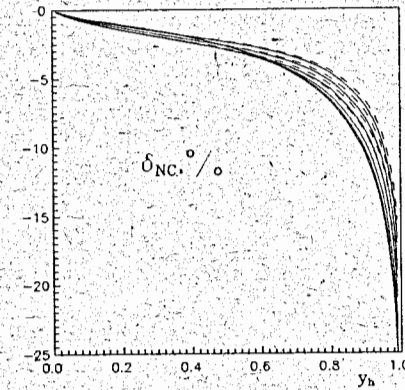


Рис. 3.c Кривые (снизу вверх) КЭД лептонные поправки к $d^2\sigma/dx_h dy_h$ в процентах для разных значений x : $x = 0.5, 0.1, 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}$. Сплошная линия: без экспоненцирования; штриховая: с экспоненцированием мягких фотонов.

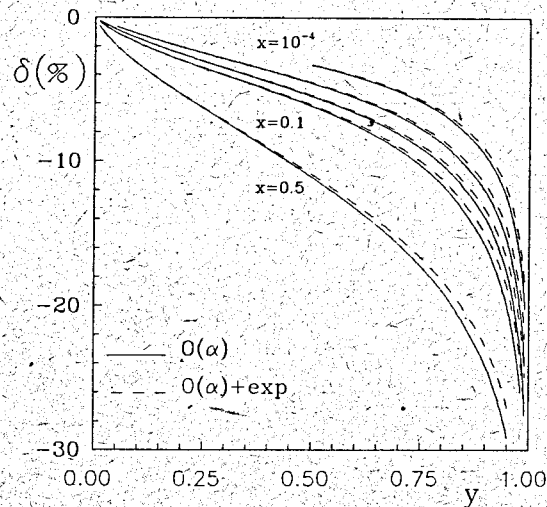


Рис. 4.а Лептонные радиационные поправки δ от $\mathcal{O}(\alpha)$ без (сплошные кривые) и с (штриховые кривые) экспоненцированием мягких фотонов в переменных Жакэ – Блонделя; параметр: $x = x_{JB} = 0.0001, 0.001, 0.01, 0.1, 0.5$.

В четвертой Главе впервые вычислены полные лептонные $\mathcal{O}(\alpha)$ КЭД поправки к глубоконеупругому ep – рассеянию в переменных Жакэ – Блонделя модельно- независимым способом. Два интегрирования по фазовому объему выполнено аналитически. После процедуры экспоненцирования мягких фотонов ожидаемая точность расчетов – порядка одного процента. Численные результаты получают при помощи расширенной версии программы TERAD91.

При вычислении дважды дифференциального сечения $d^2\sigma/dQ_{JB}^2 dy_{JB}$ для структурных функций и параметров стандартной модели были использованы те же выражения и значения, что и в Главе 3.

На Рис.4.а представлены лептонные радиационные поправки

$$\delta = \left[\frac{(d^2\sigma/dQ_{JB}^2 dy_{JB})}{(d^2\sigma_B/dQ_{JB}^2 dy_{JB})} - 1 \right] \cdot 100\%$$

в переменных Жакэ – Блонделя в процентах. По величине лептонные поправки в переменных Жакэ – Блонделя располагаются между боль-

шими лептонными поправками в лептонных переменных и соответствующими малыми в адронных переменных.

В Заключении приведено обсуждение полученных результатов.

Основные результаты, полученные в диссертации

Аналитические вычисления дифференциальных сечений проводились модельно – независимым способом, с учетом диаграмм обмена γ – квантом и Z – бозоном.

При получении формул использовалось ультрарелятивистское приближение $m \ll E_l$ (m -масса и E_l энергия начального лептона).

Численные расчеты проведены для энергий ускорителя ГЕРА: $S = 10^5 \text{ GeV}^2$ для $x \in [10^{-4}, 0.5]$ и $y \in (0, 1)$.

1. Вычислены дифференциальные угловые и энергетические распределения фотонов в процессе $ep \rightarrow e\gamma p(X)$ на ускорителе ГЕРА.
2. Обнаружена большая чувствительность энергетических и угловых спектров фотонов в неупругой реакции к выбору структурных функций в диапазоне малых углов и больших энергий излученных фотонов.
3. Получены обобщенные формулы для вклада радиационного хвоста от упругого пика в измеряемое сечение глубоконеупругого ep – рассеяния при энергиях ускорителя ГЕРА.
4. Предложена простая процедура сглаживания подинтегральной функции, которая чрезвычайно эффективна при большой энергии и малой массе излученных частиц ($m_e^2/S \sim 10^{-12}$).
5. Впервые выполнено частичное интегрирование пиков в сечении упругого радиационного хвоста в ультрарелятивистском приближении.
6. Установлено, что вклад упругого радиационного хвоста при малых x существенен.
7. Проведено полу – аналитическое, полное, модельно – независимое вычисление лептонных радиационных поправок к нейтральному

току в глубоконеупругом ep - рассеянии для четырех наборов инвариантных переменных: лептонных, смешанных, адронных, Жакэ - Блонделя.

8. Проведено вычисление сечений глубоконеупругого ep - рассеяния в нейтральном токе с экспоненцированием мягкого фотонного излучения.
9. Полный расчет в смешанных, адронных и переменных Жакэ - Блонделя выполнен впервые.
10. Создан пакет программ TERAD91 для расчета дифференциальных сечений процессов глубоконеупругого ep рассеяния с учетом радиационных эффектов при энергиях ускорителя ГЕРА. Пакет программ использовался для анализа первых данных детекторов H1 и ZEUS.

Результаты диссертации опубликованы в работах:

A.A.Akhundov, D.Yu.Bardin, C.Burdik, P.Ch.Christova,
L.V.Kalinovskaya.

Contribution of the radiative tail from the elastic peak to deep inelastic scattering at HERA.
Z.Phys. C45 (1990) 645;
Preprint JINR E2 - 89 - 405, Dubna, 1989.

A.A.Akhundov, D.Yu.Bardin, L.V.Kalinovskaya.
Electron - State Bremsstrahlung processes $ep \rightarrow e\gamma p(X)$ at HERA.
Z.Phys. C51 (1991) 557;
Preprint DESY 90-130, Hamburg, October 1990.

A.Akhundov, D.Bardin, L.Kalinovskaya and T. Riemann.
FORTRAN program TERAD.
Contribution in "Proceeding of the Workshop "Physics at HERA",
Hamburg, October 29 - 30, 1991, p. 1285.

H.Spiesberger et.al.:
Radiative correction at HERA.
Preprint CERN - TH - 6447 - 92, Geneva, March 1992;
Contribution in "Proceeding of the Workshop "Physics at HERA",
Hamburg, October 29 - 30, 1991, 798 - 839.

A.A.Akhundov, D.Yu.Bardin, L.V.Kalinovskaya, T.Riemann:
Model - independent treatment of QED corrections for deep inelastic neutral current scattering.
Nucl.Phys.B (Proc.Suppl.) 29A (1992) 209;
Preprint CERN - TH - 6470 - 92, Geneva, April 1992;
Contributed to Workshop on Elementary Particle Theory -
Deep Inelastic Scattering,
Teupitz, Germany, April 6 - 10, 1992, 209 - 202.

A.A.Akhundov, D.Yu.Bardin, L.V.Kalinovskaya, T.Riemann:
Leptonic QED corrections to the process $ep \rightarrow eX$ in Jaquet - Blondel variables.
Preprint DESY 92 - 175, Hamburg, December 1992;
Phys. Lett. B301 (1993) 447.

Рукопись поступила в издательский отдел
27 октября 1993 года.