

На правах рукописи

ГРАМОЛИН Александр Валерьевич

**ИЗУЧЕНИЕ ДВУХФОТОННОГО ОБМЕНА
И АНАЛИЗ РАДИАЦИОННЫХ ПОПРАВOK
В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ПО УПРУГОМУ РАССЕЙЯНИЮ
ЭЛЕКТРОНОВ И ПОЗИТРОНОВ НА ПРОТОНАХ**

**01.04.16 – физика атомного ядра
и элементарных частиц**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук**

НОВОСИБИРСК — 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

РАЧЕК — кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.
Игорь Анатольевич

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

АРБУЗОВ — доктор физико-математических наук, профессор РАН, Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, заместитель директора Лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова.
Андрей Борисович

ПОТЫЛИЦЫН — доктор физико-математических наук, профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, ведущий научный сотрудник.
Александр Петрович

ВЕДУЩАЯ — НИЦ «Курчатовский институт», Федеральное государственное бюджетное учреждение Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова, г. Гатчина.
ОРГАНИЗАЦИЯ

Защита диссертации состоится « 15 » июня 2017 г. в « 12:15 » часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.02 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2017 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета

д.ф.-м.н., профессор, чл.-корр. РАН

В. С. Фадин

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Протон входит в состав всех атомных ядер и является важнейшим «строительным блоком» материи. Начиная с 1950-х годов, его электромагнитная структура изучается в экспериментах по упругому электрон-протонному рассеянию. Она характеризуется электрическим, $G_E(Q^2)$, и магнитным, $G_M(Q^2)$, формфакторами протона, зависящими от квадрата переданного ему при рассеянии четырех-импульса, Q^2 . Долгое время единственным способом определения G_E и G_M был метод Розенблюта, основанный на измерении дифференциального сечения рассеяния неполяризованных электронов на неполяризованных протонах. Альтернативный метод измерения отношения G_E/G_M , использующий поляризационные наблюдаемые, был предложен в 1960-х годах, но реализован лишь спустя десятилетия. Серия поляризационных экспериментов, проведенных в Национальной лаборатории Джефферсона (США) в 2000-х годах, принесла неожиданные результаты. Оказалось, что величина G_E/G_M стремительно падает с ростом Q^2 , тогда как ранее она считалась примерно постоянной.

Обнаруженное противоречие привлекло пристальное внимание научного сообщества. Его наиболее вероятной причиной считается недостаточно аккуратный учет радиационных поправок в методе Розенблюта и, в частности, пренебрежение эффектом жесткого двухфотонного обмена. В низшем порядке по константе электромагнитного взаимодействия α знак соответствующего вклада в дифференциальное сечение зависит от знака заряда рассеиваемой частицы, что позволяет изучать этот эффект путем сравнения процессов e^-p - и e^+p -рассеяния. Впервые такие попытки были предприняты ещё в 1960-е годы, однако тогда не была достигнута необходимая точность измерений. В 2004 г. было предложено провести новое прецизионное сравнение сечений упругого e^-p - и e^+p -рассеяния на электрон-позитронном накопителе ВЭПП-3 в новосибирском Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера. В данной диссертационной работе представлены результаты этого измерения.

Критически важной частью описываемого эксперимента был учет стандартных радиационных поправок (не включающих в себя вклад жесткого двухфотонного обмена). Это объясняется тем, что интерференционный член поправки, связанной с тормозным излучением, также зависит от знака заряда рассеиваемой частицы, а его вклад сопоставим по величине с изучаемым эффектом. Также, с целью проверки альтернативного объяснения противоречия, часть диссертационной работы посвящена анализу радиационных поправок, которые использовались в двух старых экспериментах по измерению формфакторов протона методом Розенблюта.

Цель работы и задачи

Целью работы является экспериментальное изучение вклада жесткого двухфотонного обмена в дифференциальные сечения упругого рассеяния электронов и позитронов на протонах, а также разработка практических методов учета радиационных поправок к этим процессам. Для достижения этой цели было необходимо решить следующие задачи:

1. Провести экспериментальное сравнение e^-p - и e^+p -рассеяния и определить вклад жесткого двухфотонного обмена в дифференциальные сечения этих процессов.
2. Разработать процедуру учета радиационных поправок в экспериментах по упругому $e^\pm p$ -рассеянию с регистрацией электрона или позитрона на совпадении с протоном, а также подготовить соответствующий генератор событий.
3. Выполнить тщательную ревизию радиационных поправок и переобработку данных экспериментов E140 [1] и NE11 [2], проведенных в SLAC и посвященных измерению формфакторов протона методом Розенблюта.

Личный вклад автора

Изложенные в диссертации результаты получены автором лично или в соавторстве при его определяющем вкладе. Он принимал активное участие во всех стадиях эксперимента на накопителе ВЭПП-3 — от разработки и создания элементов детектора до анализа данных и подготовки публикаций. В частности, автор отвечал за учет радиационных поправок, что имело критически важное значение для корректного выделения вклада жесткого двухфотонного обмена. Разработка генератора событий ESEPP и переобработка данных SLAC были выполнены им лично.

Научная новизна

1. Осуществлено первое прямое наблюдение эффекта жесткого двухфотонного обмена в упругом электрон-протонном рассеянии.
2. Выполнено самое точное на сегодня сравнение дифференциальных сечений упругого e^-p - и e^+p -рассеяния в диапазоне по Q^2 от 0.3 до 1.5 ГэВ².
3. Впервые разработан генератор событий упругого рассеяния заряженных лептонов на протонах, в котором тормозное излучение пер-

вого порядка по α учтено без использования мягкофотонного и ультрарелятивистского приближений.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты эксперимента на накопителе ВЭПП-3 и переобработки данных SLAC важны для понимания причины противоречия между значениями G_E/G_M протона, полученными двумя разными методами. Разработанная процедура учета радиационных поправок и генератор событий ESEPP могут быть использованы в целом ряде экспериментов по измерению электромагнитных формфакторов и зарядового радиуса протона.

Положения, выносимые на защиту

1. Первое прямое наблюдение эффекта жесткого двухфотонного обмена в упругом электрон-протонном рассеянии.
2. Результаты проведенного на накопителе ВЭПП-3 прецизионного сравнения дифференциальных сечений упругого рассеяния электронов и позитронов на протонах в диапазоне по Q^2 от 0.3 до 1.5 ГэВ².
3. Процедура учета радиационных поправок первого порядка по α в экспериментах с регистрацией электрона/позитрона и протона на совпадении.
4. Генератор событий упругого рассеяния заряженных лептонов на протонах, в котором учтены радиационные поправки первого порядка по α .
5. Результаты переобработки данных экспериментов E140 и NE11, выполненных в SLAC и посвященных измерению электромагнитных формфакторов протона методом Розенблюта.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались автором на научных семинарах ИЯФ СО РАН (Новосибирск, 2012 и 2016 гг.), Национальной лаборатории Джефферсона (Ньюпорт-Ньюс, США, 2014 г.), Института физики высоких энергий (Пекин, Китай, 2015 г.), Университета науки и технологий Китая (Хэфэй, Китай, 2015 г.) и Петербургского института ядерной физики (Гатчина, 2016 г.), на научной сессии-конференции Секции ядерной физики Отделения физических наук РАН (ИТЭФ, Москва, 2009 г.), на семинаре МНТЦ «Новые перспективы физики высоких энергий» (ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 2010 г.), на 19-ой Международной

конференции по частицам и ядрам («PANIC11», МИТ, Бостон, США, 2011 г.), на Международном совещании по e^+e^- -столкновениям от ϕ до ψ («RHIPSI11», ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 2011 г.), на симпозиуме «Экспериментальные и теоретические аспекты формфакторов протона» (ПИЯФ, Гатчина, 2012 г.), на совещаниях «Электромагнитные процессы рассеяния и аннигиляции» (ЕСТ*, Тренто, Италия, 2013 г.) и «Радиационные поправки в экспериментах по аннигиляции и рассеянию» (IPN Orsay, Орсе, Франция, 2013 г.), а также на ежегодном собрании Американского физического общества («APS April Meeting 2017», Вашингтон, США, 2017 г.). Материалы диссертации опубликованы в 9 печатных работах, относящихся к изданиям, рекомендованным ВАК и входящим в международные реферативные базы данных и системы цитирования Web of Science и/или Scopus.

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается тем, что они опубликованы в авторитетных научных журналах (Physical Review Letters, Physical Review C, Journal of Physics G и др.), где прошли тщательное рецензирование. Результаты эксперимента на накопителе ВЭПП-3 находятся в согласии с данными, полученными независимо коллаборациями CLAS [3] и OLYMPUS [4].

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста, заключения и списка литературы. Она содержит 21 рисунок и 9 таблиц, а её общий объем составляет 120 страниц. Список литературы включает в себя 137 наименований.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследования, формулируется его цель, приводятся выносимые на защиту положения, обсуждаются научная новизна диссертационной работы, её теоретическая и практическая значимость, а также степень достоверности результатов.

Первая глава диссертации носит обзорный характер. В ней вводятся основные обозначения, рассматривается кинематика процесса упругого электрон-протонного рассеяния и приводится его дифференциальное се-

чение. Последнее дается известной формулой Розенблюта:

$$\frac{d\sigma_0}{d\Omega_3} = \frac{\varepsilon G_E^2 + \tau G_M^2}{\varepsilon(1 + \tau)} \frac{d\sigma_{\text{Mott}}}{d\Omega_3}, \quad (1)$$

где $\varepsilon = [1 + 2(1 + \tau) \text{tg}^2(\theta_3/2)]^{-1}$, $\tau = Q^2/(4M^2)$, θ_3 — угол рассеяния электрона, M — масса протона, а $d\sigma_{\text{Mott}}/d\Omega_3$ — дифференциальное сечение Мотта, описывающее рассеяние электронов на точечных бесспиновых зарядах. Входящую в (1) комбинацию формфакторов $\varepsilon G_E^2 + \tau G_M^2$ называют редуцированным сечением.

Здесь же рассматривается интерпретация величин G_E и G_M в системе отсчета Брейта и их связь с зарядовым и магнитным среднеквадратичными радиусами протона. Наконец, приводятся имеющиеся экспериментальные данные для формфакторов протона и обсуждается противоречие в результатах выполненных двумя разными методами измерений отношения G_E/G_M .

Вторая глава посвящена учету радиационных поправок в экспериментах по упругому e^-p -рассеянию с регистрацией только рассеянного электрона (инклюзивные измерения). Обсуждаются различия между часто используемыми подходами Мо–Тсяя [5] и Максимона–Тьёна [6]. Приведены уточненные формулы для учета поляризации вакуума, внутреннего и внешнего тормозного излучения и ионизационных потерь.

В **третьей главе** описывается переобработка данных экспериментов E140 [1] и NE11 [2], проведенных в SLAC и посвященных измерению электрического и магнитного формфакторов протона методом Розенблюта при $1 \leq Q^2 \leq 8.83 \text{ ГэВ}^2$. Цель этого анализа состояла в проверке того, может ли противоречие в данных по формфакторам протона быть объяснено недостаточно аккуратным учетом стандартных радиационных поправок в неполяризованных измерениях. Эксперименты E140 и NE11 были выбраны потому, что вместе они покрывают широкий диапазон по Q^2 , а их авторы предоставили достаточное для полного перевычисления радиационных поправок количество информации.

Переобрабатываемые данные естественным образом делятся на три группы (набора), соответствующие трем разным магнитным спектрометрам. Суммарно три набора содержат 48 измеренных дифференциальных сечений ($N_1 = 16$, $N_2 = 24$ и $N_3 = 8$). Для них по формулам, приведенным во второй главе диссертации, были заново вычислены радиационные поправки (как внутренние, так и внешние). Полученные новые значения $d\sigma_0/d\Omega_3$ оказались больше исходных на величину от 0.09% до 2.17%.

Для извлечения формфакторов G_E и G_M искался минимум функции

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{N_i} \frac{[n_i \sigma_{ij} - \varepsilon_{ij} G_E^2(\tau_{ij}) - \tau_{ij} G_M^2(\tau_{ij})]^2}{(\Delta \sigma_{ij})^2} + \sum_{i=1}^3 \frac{(n_i - 1)^2}{(\Delta n_i)^2}, \quad (2)$$

где n_i — это три неизвестных нормировочных множителя для трех наборов данных, Δn_i — соответствующие погрешности ($\Delta n_1 = 1.9\%$, $\Delta n_{2,3} = 1.77\%$), σ_{ij} — измеренные редуцированные сечения и $\Delta \sigma_{ij}$ — сложенные квадратично статистическая и систематическая погрешности для σ_{ij} . Индекс $i = 1, 2, 3$ нумерует три набора данных, а j — различные кинематики внутри каждого набора.

Минимизация функции (2) может быть выполнена аналитически, если выбрать для G_E^2 и G_M^2 следующие параметризации, линейные по подгоночным параметрам a_i и b_i :

$$G_E^2(\tau) = (1 - a_1 \tau - a_2 \tau^2 - a_3 \tau^3) G_D^2(\tau), \quad (3)$$

$$G_M^2(\tau) = (1 - b_1 \tau - b_2 \tau^2 - b_3 \tau^3) \mu^2 G_D^2(\tau), \quad (4)$$

где G_D — это дипольный формфактор, а $\mu \approx 2.79$ — магнитный момент протона. Найденное минимальное значение равно $\chi^2 = 26.1$ для 39 степеней свободы, а соответствующие оптимальные подгоночные параметры и их погрешности приведены в Таблице 1. Все входные данные и исходный код используемой для расчетов программы доступны на веб-странице <https://github.com/gramolin/rosenbluth/>.

На Рисунке 1 результаты переработки сравниваются с оригинальными данными и с параметризацией Келли [7], в которой учтены некоторые из поляризационных измерений. Видно, что новые значения формфакторов протона согласуются с данными поляризационных измерений несколько лучше оригинальных, хотя существенное расхождение сохраняется при $Q^2 \gtrsim 3 \text{ ГэВ}^2$. Таким образом, обсуждаемое противоречие для G_E/G_M не удается объяснить лишь неточностями при учете стандартных радиационных поправок в методе Розенблюта.

В **четвертой главе** диссертации изложена процедура учета радиационных поправок первого порядка по α в экспериментах с регистрацией

Таблица 1. Оптимальные подгоночные параметры и их погрешности.

	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$
n_i	1.012 ± 0.011	1.014 ± 0.011	0.975 ± 0.011
a_i	0.197 ± 0.211	0.703 ± 0.426	-0.454 ± 0.209
b_i	-0.444 ± 0.043	0.397 ± 0.045	-0.081 ± 0.013

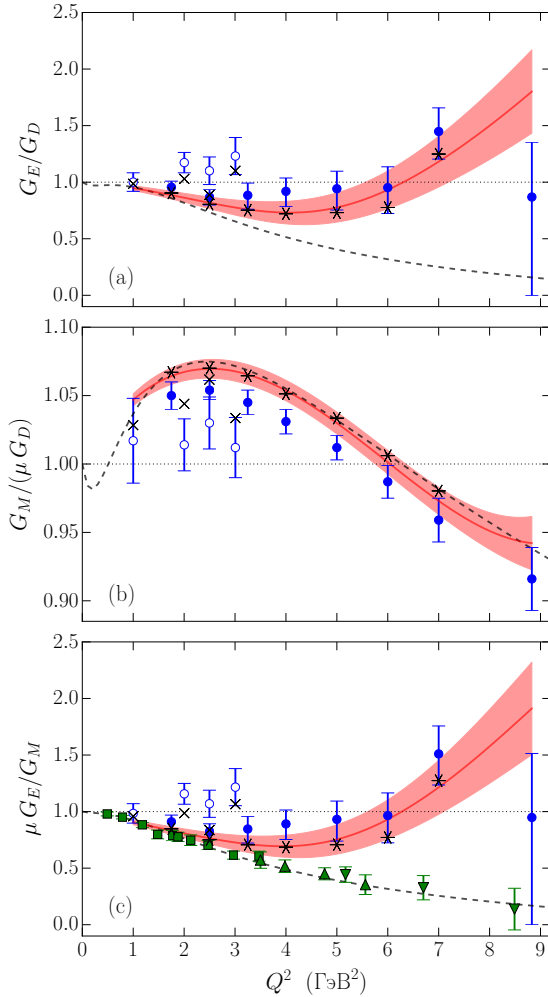


Рис. 1. Результаты переобработки в сравнении с оригинальными данными. Сплошными линиями показаны результаты подгонки с использованием параметризации (3)–(4), а соответствующие полосы — это 68%-е доверительные интервалы. Полыми и закрашенными кружками изображены оригинальные данные экспериментов E140 и NE11, соответственно. Крестики и звездочки иллюстрируют, как переобработка влияет на отдельные точки. Пунктирные кривые соответствуют параметризации Келли. Квадратиками и треугольниками показаны результаты некоторых поляризационных измерений отношения $\mu G_E/G_M$.

электрона или позитрона на совпадении с протоном (эксклюзивные измерения). При этом для расчета внутреннего тормозного излучения не используются ни мягкофотонное, ни ультрарелятивистское приближения. Кинематика процесса также рассматривается без пренебрежения массой лептона, что может быть важно в случае экспериментов с мюонными пучками (например, MUSE).

Здесь же представлен новый генератор событий упругого рассеяния заряженных лептонов (e^\pm или μ^\pm) на протонах, в котором учтены радиационные поправки первого порядка по α . Генератор, названный ESEPP, использовался в эксперименте на накопителе ВЭПП-3, а также может оказаться полезным для целого ряда новых экспериментов по измерению электромагнитных формфакторов и зарядового радиуса протона. Приводится описание алгоритма его работы, входных параметров и формата выходных файлов, а также показаны примеры сгенерированных событий. ESEPP написан на языке программирования C++, а его исходный код доступен на веб-странице <https://github.com/gramolin/esepf>.

Пятая глава содержит описание проведенного в ИЯФ СО РАН на накопителе ВЭПП-3 эксперимента по прецизионному сравнению сечений упругого рассеяния электронов и позитронов на протонах в диапазоне по Q^2 от 0.3 до 1.5 ГэВ². Набор данных осуществлялся в два этапа, при двух разных энергиях пучка и конфигурациях детектора. В сеансе I (сентябрь–декабрь 2009 г.) измерения проводились при энергии пучков в 1.6 ГэВ, а в сеансе II (с сентября 2011 г. по март 2012 г.) — 1 ГэВ. В качестве мишени использовалась накопительная ячейка, заполняемая сверхчистым газообразным водородом и расположенная внутри вакуумной камеры ВЭПП-3. Рассеянный лептон и протон отдачи регистрировались на совпадении широкоапертурным немагнитным детектором, содержащим дрейфовые и многопроволочные пропорциональные камеры, сцинтилляционные счетчики и электромагнитный калориметр на основе кристаллов CsI и NaI. Использование немагнитного детектора позволило обеспечить идентичные аксептансы для электронов и позитронов, что дало важное преимущество перед экспериментами CLAS [3] и OLYMPUS [4]. Другим эффективным методом снижения систематических погрешностей измерения было частое чередование пучков e^- и e^+ .

Для нормирования светимостей, набранных с электронными и позитронными пучками, использовались события упругого $e^\pm p$ -рассеяния на малые углы (где эффектом жесткого двухфотонного обмена можно пренебречь). Соответствующие кинематические интервалы обозначаются с помощью аббревиатуры LNP (Luminosity Normalization Point).

Измеряемой величиной является отношение $R = \sigma(e^+p)/\sigma(e^-p)$, кото-

рое после учета радиационных поправок принимает вид

$$R_{2\gamma} = \frac{1 - \delta_{2\gamma}}{1 + \delta_{2\gamma}} \approx 1 - 2\delta_{2\gamma}, \quad (5)$$

где

$$\delta_{2\gamma} = \frac{2 \operatorname{Re}(\mathcal{M}_{1\gamma}^\dagger \mathcal{M}_{2\gamma}^{\text{hard}})}{|\mathcal{M}_{1\gamma}|^2} \quad (6)$$

— это искомый вклад жесткого двухфотонного обмена в дифференциальное сечение (1), а $\mathcal{M}_{1\gamma}$ и $\mathcal{M}_{2\gamma}$ — это амплитуды процессов однофотонного и двухфотонного обмена, соответственно. Кинематические параметры и численные результаты эксперимента приведены в Таблице 2.

На Рисунке 2 результаты эксперимента на накопителе ВЭПП-3 сравниваются с данными, полученными в 1960-х годах, а также с несколькими теоретическими и феноменологическими предсказаниями [8–13]. Наиболее правдоподобными представляются адронные вычисления [8,9] и феноменологическая модель [10], которые разрешают противоречие для форм-факторов протона при больших Q^2 и полностью сводят его к эффекту жесткого двухфотонного обмена. Таким образом, результаты обсуждаемого эксперимента свидетельствуют в пользу этого объяснения. В то же время полученные данные не согласуются с гипотезой нулевого неучтенного вклада двухфотонного обмена ($R_{2\gamma} \equiv 1$), которой соответствует значение $\chi^2 = 31.9$ для 4 степеней свободы и вероятность $p = 2 \cdot 10^{-6}$. Это позволяет говорить о первом прямом наблюдении эффекта жесткого двухфотонного обмена в упругом $e^\pm p$ -рассеянии.

Таблица 2. Кинематические параметры и результаты эксперимента.

	Сеанс I			Сеанс II		
	№1	№2	LNP	№3	№4	LNP
E_1 (ГэВ)	1.594	1.594	1.594	0.998	0.998	0.998
ε_{\min}	0.29	0.89	0.96	0.18	0.33	0.88
ε_{\max}	0.58	0.97	0.99	0.33	0.51	0.97
$\langle \varepsilon \rangle$	0.452	0.932	0.980	0.272	0.404	0.931
$\langle Q^2 \rangle$ (ГэВ ²)	1.51	0.298	0.097	0.976	0.830	0.128
$\langle \theta_3 \rangle$	66.2°	20.8°	11.4°	91.3°	75.4°	21.4°
R	1.0705	1.0037	...	1.0555	1.0447	...
$R_{2\gamma}$	1.0332	1.0002	1	1.0174	1.0133	1
$\Delta R_{2\gamma}^{\text{stat}}$	± 0.0112	± 0.0012	...	± 0.0049	± 0.0037	...
$\Delta R_{2\gamma}^{\text{syst}}$	± 0.0032	± 0.0020	...	± 0.0016	± 0.0008	...

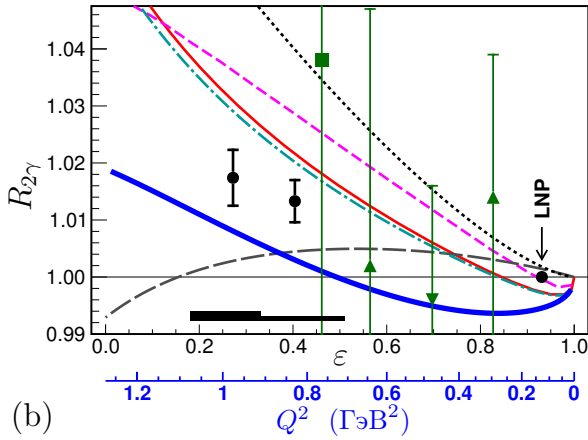
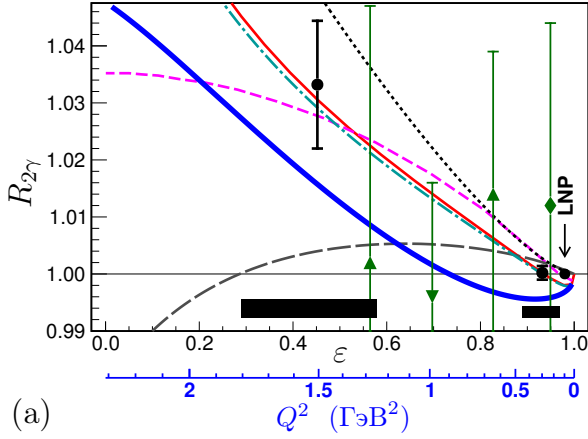


Рис. 2. Экспериментальные данные (маркеры) и предсказания (кривые) для отношения $R_{2\gamma}$ в зависимости от ϵ или Q^2 . Рисунки (a) и (b) относятся, соответственно, к сеансам I и II эксперимента на ВЭПП-3. Маркерами представлены результаты обсуждаемого эксперимента (\bullet) и некоторые данные 1960-х годов (\blacksquare , \blacktriangledown , \blacklozenge и \blacktriangle). Для четырех точек ВЭПП-3 вертикальными «усами» показаны статистические погрешности, а черными полосами — систематические погрешности и размеры бинов. Кривые соответствуют следующим предсказаниям: [8] (штрихпунктирная линия), [9] (тонкая сплошная линия), [10] (толстая сплошная линия), [11] (длинные штрихи), [12] (короткие штрихи) и [13] (точки).

Чтобы аккуратно сравнить между собой экспериментальные данные ВЭПП-3, CLAS и OLYMPUS, предположим, следуя работе [10], что величина $\delta_{2\gamma}$ может быть параметризована как

$$\delta_{2\gamma}(Q^2, \varepsilon) = \delta_F - (1 - \varepsilon) \tilde{\delta}_{2\gamma}(Q^2), \quad (7)$$

где

$$\delta_F = \alpha\pi \frac{\sin(\theta_3/2)}{1 + \sin(\theta_3/2)} = \alpha\pi \frac{\sqrt{1-\varepsilon}}{\sqrt{1-\varepsilon} + \sqrt{1+\varepsilon+2\varepsilon\tau}} \quad (8)$$

— это так называемая поправка Фешбаха, которая имеет правильную асимптотику при $Q^2 \rightarrow 0$. Второй член в выражении (7) выбран так, чтобы он линейно зависел от ε и обращался в ноль при $\varepsilon = 1$. Тогда, принимая во внимание формулу (5), можно записать следующее выражение для $\tilde{\delta}_{2\gamma}$:

$$\tilde{\delta}_{2\gamma} = \frac{R_{2\gamma} - 1 + 2\delta_F}{2(1 - \varepsilon)}. \quad (9)$$

В отличие от $\delta_{2\gamma}(Q^2, \varepsilon)$, величина (9) зависит только от Q^2 .

Значения $\tilde{\delta}_{2\gamma}$, вычисленные по данным современных экспериментов, показаны на Рисунке 3. Видно, что все три измерения хорошо согласуются друг с другом, при этом результаты сеанса II эксперимента на накопителе ВЭПП-3 имеют рекордную точность. В целом, можно сделать вывод о том, что величина (9) отлична от нуля и положительна.

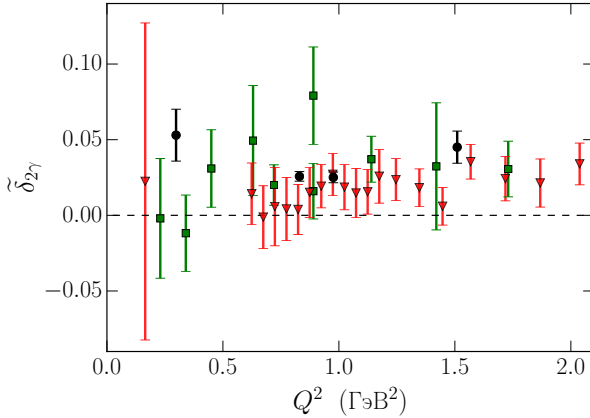


Рис. 3. Результаты трех современных экспериментов: ● ВЭПП-3, ■ CLAS и ▼ OLYMPUS. Показана величина (9) в зависимости от Q^2 .

В **заключении** приведены основные результаты работы:

1. Впервые осуществлено прямое наблюдение эффекта жесткого двухфотонного обмена в упругом электрон-протонном рассеянии. Результаты измерения на накопителе ВЭПП-3 находятся в удовлетворительном согласии с несколькими теоретическими и феноменологическими моделями, которые объясняют противоречие в данных по формфакторам протона неучтенным вкладом жесткого двухфотонного обмена. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют в пользу этого объяснения.
2. В эксперименте на накопителе ВЭПП-3 проведено прецизионное (с относительной точностью $\lesssim 1\%$) сравнение дифференциальных сечений упругого рассеяния электронов и позитронов на протонах в диапазоне по Q^2 от 0.3 до 1.5 ГэВ². Полученные результаты превосходят по точности все имеющиеся мировые данные, включая те, которые были представлены недавно коллаборациями CLAS и OLYMPUS.
3. Разработана процедура учета радиационных поправок первого порядка по α в экспериментах с регистрацией электрона/позитрона и протона на совпадении. При этом для учета внутреннего тормозного излучения не используются ни мягкофотонное, ни ультрарелятивистское приближения.
4. Разработан новый генератор событий упругого рассеяния заряженных лептонов (e^\pm или μ^\pm) на протонах, в котором учтены радиационные поправки первого порядка по α . Генератор ESEPP использовался в эксперименте на накопителе ВЭПП-3, а также может оказаться полезным для целого ряда новых экспериментов по измерению электромагнитных формфакторов и зарядового радиуса протона.
5. Переобработаны данные экспериментов E140 [1] и NE11 [2], выполненных в SLAC и посвященных измерению формфакторов протона $G_E(Q^2)$ и $G_M(Q^2)$ методом Розенблюта. При этом проведена тщательная ревизия всех радиационных поправок (как внутренних, так и внешних) и заново извлечены G_E и G_M для Q^2 в диапазоне от 1 до 8.83 ГэВ². Наши результаты согласуются лучше оригинальных с данными поляризационных измерений отношения G_E/G_M , хотя при $Q^2 \gtrsim 3$ ГэВ² сохраняется существенное расхождение.

Публикации автора по теме диссертации

1. Николенко Д. М., Аренховель Х., Аррингтон Дж., . . . , Грамолин А. В. и др. Эксперименты с внутренними мишенями на накопителе электронов ВЭПП-3 // Ядерная физика. 2010. Т. 73. С. 1365–1381.
2. Gramolin A. V., Arrington J., Barkov L. M. et al. Measurement of the two-photon exchange contribution in elastic ep scattering at VEPP-3 // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). 2012. Vol. 225–227. P. 216–220.
3. Gramolin A. V., Fadin V. S., Feldman A. L. et al. A new event generator for the elastic scattering of charged leptons on protons // J. Phys. G. 2014. Vol. 41. P. 115001.
4. Kaminskiy V. V., Gramolin A. V., Mishnev S. I. et al. Beam energy measurements for an experiment on elastic $e^\pm p$ scattering at the VEPP-3 storage ring // J. Instrum. 2014. Vol. 9. P. T06006.
5. Nikolenko D. M., Arrington J., Barkov L. M., . . . , Gramolin A. V. et al. Two-photon exchange contribution in elastic electron-proton scattering, experiment at the VEPP-3 storage ring // EPJ Web Conf. 2014. Vol. 66. P. 06002.
6. Николенко Д. М., Аррингтон Дж., Барков Л. М., . . . , Грамолин А. В. и др. Формфакторы протона и двухфотонный обмен в упругом ep -рассеянии // Ядерная физика. 2015. Т. 78. С. 423–433.
7. Rachek I. A., Arrington J., Dmitriev V. F., . . . , Gramolin A. V. et al. Two-photon exchange contribution to elastic electron-proton scattering: measurements at the VEPP-3 storage ring // Phys. Scripta. 2015. Vol. T166. P. 014017.
8. Rachek I. A., Arrington J., Dmitriev V. F., . . . , Gramolin A. V. et al. Measurement of the two-photon exchange contribution to the elastic $e^\pm p$ scattering cross sections at the VEPP-3 storage ring // Phys. Rev. Lett. 2015. Vol. 114. P. 062005.
9. Gramolin A. V., Nikolenko D. M. Reanalysis of Rosenbluth measurements of the proton form factors // Phys. Rev. C. 2016. Vol. 93. P. 055201.

Список литературы

- [1] Walker R. C. et al. Measurements of the proton elastic form factors for $1 \leq Q^2 \leq 3$ (GeV/c)² at SLAC // Phys. Rev. D. 1994. Vol. 49. P. 5671–5689.
- [2] Andivahis L. et al. Measurements of the electric and magnetic form factors of the proton from $Q^2 = 1.75$ to 8.83 (GeV/c)² // Phys. Rev. D. 1994. Vol. 50. P. 5491–5517.
- [3] Adikaram D. et al. Towards a resolution of the proton form factor problem: New electron and positron scattering data // Phys. Rev. Lett. 2015. Vol. 114. P. 062003.
- [4] Henderson B. S. et al. Hard two-photon contribution to elastic lepton-proton scattering determined by the OLYMPUS experiment // Phys. Rev. Lett. 2017. Vol. 118. P. 092501.
- [5] Mo L. W., Tsai Y. S. Radiative corrections to elastic and inelastic ep and μp scattering // Rev. Mod. Phys. 1969. Vol. 41. P. 205–235.
- [6] Maximon L. C., Tjon J. A. Radiative corrections to electron-proton scattering // Phys. Rev. C. 2000. Vol. 62. P. 054320.
- [7] Kelly J. J. Simple parametrization of nucleon form factors // Phys. Rev. C. 2004. Vol. 70. P. 068202.
- [8] Borisjuk D., Kobushkin A. Two-photon exchange in a dispersion approach // Phys. Rev. C. 2008. Vol. 78. P. 025208.
- [9] Blunden P. G. et al. Two-photon exchange in elastic electron-nucleon scattering // Phys. Rev. C. 2005. Vol. 72. P. 034612.
- [10] Bernauer J. C. et al. Electric and magnetic form factors of the proton // Phys. Rev. C. 2014. Vol. 90. P. 015206.
- [11] Tomasi-Gustafsson E. et al. Compilation and analysis of charge asymmetry measurements from electron and positron scattering on nucleon and nuclei // Phys. Atom. Nucl. 2013. Vol. 76. P. 937–946.
- [12] Arrington J., Sick I. Coulomb distortion in high- Q^2 elastic $e-p$ scattering // Phys. Rev. C. 2004. Vol. 70. P. 028203.
- [13] Qattan I. A. et al. Reexamination of phenomenological two-photon exchange corrections to the proton form factors and $e^\pm p$ scattering // Phys. Rev. C. 2011. Vol. 84. P. 054317.

ГРАМОЛИН Александр Валерьевич

**Изучение двухфотонного обмена
и анализ радиационных поправок
в эксперименте по упругому рассеянию
электронов и позитронов на протонах**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 5.04.2017 г.

Подписано к печати 6.04.2017 г.

Формат 60×90 1/16 Объём 1,0 печ.л., 0,8 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 4

Обработано на IBM PC и отпечатано
на ротапринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.