



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
(НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ)

мкр. Орлова роща, д. 1, г. Гатчина, Ленинградская область, 188300
Телефон: (81371) 4-60-25, факс: (81371) 3-60-25. E-mail: dir@pnpi.nrcki.ru
ОКПО 02698654, ОГРН 1034701242443, ИНН 4705001850, КПП 470501001

УТВЕРЖДАЮ

№ 1

« 17 » мая 2017 г.

Заместитель директора по научной работе
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ



д.ф.-м.н. **В.В. Воронин**

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

– Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» –
на диссертацию **Грамолина Александра Валерьевича «Изучение
двухфотонного обмена и анализ радиационных поправок в
эксперименте по упругому рассеянию электронов и позитронов на
протонах»**, представленную на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика
атомного ядра и элементарных частиц

Диссертация А.В. Грамолина посвящена экспериментальному изучению вклада жесткого двухфотонного обмена в дифференциальное сечение упругого электрон-протонного рассеяния и анализу радиационных поправок к этому процессу. Хорошо известно, что эксперименты по упругому электрон-протонному рассеянию дают ценную информацию о внутренней структуре протона, важнейшего «строительного блока» материи. В частности, в них измеряются его электрический, $G_E(Q^2)$, и магнитный, $G_M(Q^2)$, формфакторы, зависящие от квадрата переданного четырехимпульса и характеризующие пространственное распределение заряда и магнитного момента внутри протона. Длительное время единственным способом определения G_E и G_M оставался метод Розенблюта, основанный на измерении дифференциального сечения упругого рассеяния неполяризованных электронов на неполяризованной протонной мишени. Еще в 1960-х годах был предложен другой метод, использующий

поляризационные наблюдаемые реакции, однако реализован он был лишь спустя несколько десятилетий. Проведенные в 2000-х годах поляризационные измерения отношения G_E/G_M принесли неожиданные результаты, противоречащие классическим данным по формфакторам протона, полученным методом Розенблюта. Наиболее вероятным объяснением данного противоречия считается недостаточно аккуратный учет радиационных поправок в неполяризационных экспериментах и, в частности, пренебрежение эффектом жесткого двухфотонного обмена. В диссертационной работе А.В. Грамолина этот эффект изучается с помощью прецизионного сравнения сечений упругого электрон-протонного и позитрон-протонного рассеяния. Критически важной частью этого эксперимента был учет стандартных радиационных поправок, анализу которых в диссертации уделено пристальное внимание. **Все это свидетельствует об актуальности диссертационного исследования, а также его высокой научной значимости.**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем работы составляет 120 страниц, включая 21 рисунок и 9 таблиц. Список литературы содержит 137 наименований и охватывает заметную часть современных научных публикаций по обсуждаемым вопросам.

Во введении обосновывается актуальность исследования и формулируется его цель: «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». Здесь же указаны выносимые на защиту положения, обсуждаются научная новизна работы, ее теоретическая и практическая значимость, степень достоверности полученных результатов, а также приводятся сведения об апробации результатов и публикациях.

В первой главе, которая является обзорной, рассматриваются кинематика процесса упругого электрон-протонного рассеяния, его дифференциальное сечение, интерпретация электрического и магнитного формфакторов протона в системе отсчета Брейта, приводятся имеющиеся экспериментальные данные для G_E и G_M , а также обсуждается противоречие в результатах измерений отношения G_E/G_M , полученных двумя разными методами.

Вторая глава посвящена учету радиационных поправок в экспериментах по упругому электрон-протонному рассеянию, в которых регистрируется только рассеянный электрон. В ней обсуждаются как стандартные формулы, так и уточнения к ним, связанные с поляризацией вакуума, внутренним и внешним тормозным излучением и ионизационными потерями. **Представленные здесь результаты имеют несомненную практическую ценность для обработки данных инклюзивных измерений.**

В третьей главе описывается проведенная диссертантом переобработка данных двух старых экспериментов SLAC по измерению формфакторов протона методом Розенблюта в диапазоне по Q^2 от 1 до 8.83 (ГэВ/с)^2 . Цель этого анализа состояла в проверке предположения о том, что противоречие в данных для отношения G_E/G_M связано с недостаточно аккуратным учетом стандартных радиационных поправок в неполяризационных измерениях. Для этого по формулам из второй главы диссертации были заново вычислены все радиационные поправки – как внутренние, так и внешние. Полученные в результате новые значения дифференциальных сечений

больше исходных на величину от 0.1% до 2.2%. Для извлечения G_E и G_M используется процедура, отличающаяся от стандартной методики розенблютовского разделения формфакторов протона. Полученные результаты лучше согласуются с данными поляризационных измерений, чем оригинальные, но при $Q^2 > 3$ (ГэВ/с)² сохраняется существенное расхождение. Отсюда делается вывод, что противоречие в данных для G_E/G_M не может быть объяснено лишь неточностями при учете стандартных радиационных поправок в методе Розенблюта.

Четвертая глава диссертации посвящена процедуре учета радиационных поправок низшего порядка по α в экспериментах с регистрацией заряженного лептона (электрона или мюона) и протона на совпадении. **Достоинством представленного подхода является то, что для учета тормозного излучения не используются ни мягкофотонное, ни ультрарелятивистское приближения.** На основе описанной процедуры разработан новый генератор событий ESEPP, исходный код которого находится в свободном доступе. **Практическая ценность ESEPP обусловлена тем, что он подходит для использования во многих экспериментах по измерению электромагнитных формфакторов протона и его зарядового радиуса.**

В пятой главе диссертации описывается проведенный на накопителе ВЭПП-3 прецизионный эксперимент по сравнению сечений упругого рассеяния электронов и позитронов на протонах при Q^2 от 0.3 до 1.5 (ГэВ/с)². Такое сравнение позволило выделить вклад жесткого двухфотонного обмена в сечение упругого электрон-протонного рассеяния. Полученные результаты сравниваются с несколькими теоретическими и феноменологическими моделями, а также с данными аналогичных измерений, выполненных недавно коллаборациями CLAS и OLYMPUS. **Важным преимуществом эксперимента на накопителе ВЭПП-3 является использование немагнитного детектора, который гарантировал одинаковые аксептансы для электронов и позитронов, что помогло достичь малых систематических погрешностей измерения. Это, в свою очередь, позволило впервые наблюдать эффект жесткого двухфотонного обмена в упругом электрон-протонном рассеянии.** Результаты эксперимента на ВЭПП-3 свидетельствуют в пользу того, что пренебрежение этим эффектом является причиной наблюдающегося противоречия в данных для G_E/G_M .

В заключении перечислены основные результаты диссертационной работы: первое прямое наблюдение эффекта жесткого двухфотонного обмена в упругом электрон-протонном рассеянии; прецизионное сравнение сечений упругого рассеяния электронов и позитронов на протонах при Q^2 от 0.3 до 1.5 (ГэВ/с)²; разработка процедуры учета радиационных поправок первого порядка по α в экспериментах с регистрацией рассеянного лептона и протона на совпадении, не прибегающей к часто используемым мягкофотонному и ультрарелятивистскому приближениям; разработка соответствующего универсального генератора событий; и переобработка данных экспериментов E140 и NE11 для проверки альтернативного объяснения проблемы формфакторов протона.

Результаты диссертационной работы являются оригинальными, поэтому их научная новизна не вызывает сомнений. Отдельно стоит отметить первое прямое наблюдение эффекта жесткого двухфотонного обмена в упругом электрон-протонном рассеянии. В целом, работа выполнена на высоком научном уровне. Диссертация написана хорошим языком и снабжена достаточным количеством

иллюстративного материала. **Аннотация диссертации адекватно передает ее основное содержание.** Результаты работы опубликованы в авторитетных научных журналах и неоднократно докладывались диссертантом на международных конференциях и семинарах. Они хорошо известны научному сообществу и уже процитированы в десятках публикаций. **О достоверности результатов эксперимента на ВЭПП-3 свидетельствует то, что они согласуются с данными, полученными коллаборациями CLAS и OLYMPUS, но при этом превосходят их по точности.**

Несмотря на высокую оценку диссертации, к ней имеется ряд замечаний и пожеланий, перечисленных ниже.

1. В подписи к Рисунку 5.10 на стр. 106 диссертации указано, что треугольные маркеры соответствуют данным CLAS, а квадратные – данным OLYMPUS. Этот же график приведен в аннотации (Рисунок 3), но там дается противоположная интерпретация маркеров, которая, по видимому, и является правильной.
2. В разных главах диссертации встречаются одинаковые формулы, например: (1.10) и (5.12), (1.11) и (5.13), (1.12) и (5.10), (2.14) и (4.71), (4.82) и (5.1). Таких повторений следует избегать и ссылаться на приведенные ранее выражения.
3. В диссертации приведены ссылки на многие теоретические расчеты жесткого двухфотонного обмена, но не обсуждаются лежащие в их основе принципы и приближения. Этого не сделано даже для тех моделей, предсказания которых сравниваются с данными эксперимента на накопителе ВЭПП-3.
4. Как в диссертации, так и в аннотации подчеркивается, что генератор событий ESEPP может быть полезен для учета радиационных поправок в готовящихся экспериментах по измерению зарядового среднеквадратичного радиуса протона. При этом совсем не упомянута интереснейшая проблема радиуса протона, на решение которой и направлены такие эксперименты (PRad, MUSE и др.).
5. Было бы полезно ввести сокращения для часто встречающихся в диссертации словосочетаний, например: двухфотонный обмен (ДФО), радиационная поправка (РП), квантовая хромодинамика (КХД) и т. п.

Указанные недостатки не влияют на положения, выносимые диссертантом на защиту, и не снижают общую положительную оценку работы. Полученные в ней результаты имеют несомненную теоретическую и практическую значимость. Они важны для установления причины противоречия в данных по формфакторам протона, полученных двумя разными методами. Приведенные в диссертации формулы и разработанный на их основе универсальный генератор событий ESEPP могут быть использованы в ряде экспериментов по упругому электрон-протонному рассеянию, направленных на измерение электромагнитных формфакторов и зарядового радиуса протона. **Полученные в диссертационной работе результаты уже используются или могут быть использованы в таких научных центрах, как Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова, Лаборатория Джефферсона (США), Институт Пауля Шеррера (Швейцария), Майнцский университет им. Иоганна Гутенберга (Германия) и др.**

На основании всего сказанного можно сделать вывод, что диссертация А.В. Грамолина «Изучение двухфотонного обмена и анализ радиационных поправок в эксперименте по упругому рассеянию электронов и позитронов на протонах» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой получены новые интересные результаты, важные для понимания электромагнитной структуры протона. Она соответствует всем требованиям и критериям, предъявляемым к кандидатским диссертациям и установленным постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор, Грамолин Александр Валерьевич, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Диссертационная работа А.В. Грамолина была доложена и обсуждалась на научном семинаре Отделения физики высоких энергий (ОФВЭ) НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, состоявшемся 1 ноября 2016 г. Отзыв утвержден на заседании Ученого совета ОФВЭ ПИЯФ, протокол № 83 от 15 ноября 2016 г.

Отзыв подготовил заведующий
Лабораторией малонуклонных систем,
д.ф.-м.н., профессор



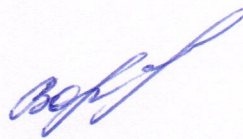
С.Л. Белостоцкий
Belostotski_SL@pnpi.nrcki.ru

Руководитель
Отделения физики высоких энергий
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ,
д.ф.-м.н., профессор, чл.-корр. РАН



А.А. Воробьев
Vorobyov_AA@pnpi.nrcki.ru

Ученый секретарь
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ,
к.ф.-м.н.



С.И. Воробьев
Vorobyev_SI@pnpi.nrcki.ru

Контакты ведущей организации:

ФГБУ Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
188300, Ленинградская область, г. Гатчина, мкр. Орлова роща, д. 1
Тел.: +7 (81371) 460-25, E-mail: dir@pnpi.nrcki.ru