



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константина
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

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

№ д1

«08 » сентября 2020 г.

д.ф.-м.н. В.В. Воронин



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» на диссертацию Романа Евгеньевича Герасимова **«Радиационные поправки к сечению электрон-протонного рассеяния в экспериментах по изучению вклада двухфотонного обмена и измерению зарядового радиуса протона»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 — «Теоретическая физика».

На сегодняшний день исследование внутренней структуры протона является одной из приоритетных задач экспериментальной и теоретической физики частиц. Упругое лептон-протонное рассеяние – один из важнейших инструментов исследований такого рода. При этом имеющиеся данные для неполяризованных дифференциальных сечений упругого e^-p -рассеяния оказываются в противоречии с измерениями, проведенными альтернативными методами:

- обнаружено различие экспериментальных результатов измерения зависимости поведения электромагнитных форм-факторов протона от квадрата переданного импульса $G_{E,M}(Q^2)$ в экспериментах по поляризованному и неполяризованному e^-p -рассеянию;

- зарядовый радиус протона r_E , полученный из спектроскопических исследований водорода и μ^-p -атомов, оказывается меньше полученного методом e^-p -рассеяния.

Для разрешения этих противоречий, с одной стороны, предложены различные теоретические интерпретации, включающие проявления Новой физики за пределами Стандартной модели, а с другой стороны, выполнены или находятся в стадии разработки новые прецизионные эксперименты для уточнения ранних измерений упругого рассеяния лептонов на протоне. Так, например, на коллайдере ВЭПП-3 в ИЯФ СО РАН был обнаружен (на уровне 1%) вклад амплитуды двухфотонного обмена (ДФО) в реакцию упругого e^-p -рассеяния. Находится в стадии подготовки эксперимент PRES в Майнце для измерения r_E в e^-p -рассеянии методом активной мишени, по предложению группы НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ. Главное отличие этого эксперимента от всех проведенных ранее в том, что переданный импульс Q^2 будет измеряться из кинетической энергии протона отдачи, а не из угла рассеянного электрона. В таком случае можно ожидать, что радиационные поправки могут быть значительно меньшими, чем при постановке эксперимента с детектированием рассеянного электрона, что позволит достигнуть лучшей точности измерений. Поэтому анализ данных по e^-p -рассеянию требует аккуратного учета радиационных поправок к сечению в различных постановках эксперимента.

Основной целью рассматриваемой диссертационной работы Герасимова Р.Е. являлось углубленное изучение радиационных поправок, а именно: сравнение расчетов радиационных поправок, основанных на приближении мягких фотонов с точными результатами, полученными в приближении бесструктурного протона; исследование радиационных поправок с возбуждением Δ -изобары на амплитуду ДФО; исследование радиационных поправок для постановки эксперимента по измерению зарядового радиуса протона методом активной мишени. Таким образом, **важность и актуальность** темы диссертационной работы не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, четырех глав основной части, заключения и двух приложений. Представленная работа содержит 105 страниц, 13 рисунков и 1 таблицу, список литературы содержит 88 наименований. Автореферат адекватно отражает основное содержание диссертации.

Во **введении** обосновывается актуальность, научная и практическая ценность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи работы, а также положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** обсуждается упругое рассеяние электронов на протонах в

лидирующем (борновском) приближении. Описывается процедура извлечения отношения электрического и магнитного форм-факторов протона методом разделения Розенблюта и в поляризационных измерениях. Обсуждается извлечение зарядового радиуса протона путем измерения сечения упругого e^-p -рассеяния при малых Q^2 . Данная глава носит обзорный характер.

Во второй главе проведено сравнение точных и приближенных, основанных на приближении мягких фотонов, методов расчёта радиационных поправок к сечению упругого e^-p -рассеяния. Для сравнения используется модель бесструктурного протона. Подтверждено, что два имеющихся варианта расчета (работы Мо и Тсая, и работы Максимона и Тьена) дают адекватное приближение конечного результата. При этом установлено конкретное место в схеме вычислений, приводящее к расхождению результатов полученных двумя приближенными методами для постановки эксперимента с магнитным спектрометром. Полученные в первой главе результаты носят методический характер и будут полезны при планировании экспериментов на магнитных спектрометрах.

В третьей главе обсуждается влияние резонанса $\Delta(1232)$ на радиационные поправки от тормозного излучения. Решение данной задачи важно для анализа результатов эксперимента на накопительном кольце ВЭПП-3. В результате делается вывод о том, что возможный вклад в радиационные поправки от тормозного излучения с учетом возбуждения $\Delta(1232)$ не может существенно повлиять на наблюдаемое в эксперименте ВЭПП-3 отношение сечений рассеяния электронов и позитронов на протонах. Обнаруженный эффект оказался также пренебрежимо малым и для экспериментов по изучению упругого e^-p -рассеяния при помощи магнитного спектрометра.

В четвёртой главе исследуются радиационные поправки в экспериментах по изучению зарядового радиуса протона путем регистрации протонов отдачи. Для такой постановки эксперимента установлен факт сокращения главных вкладов в радиационные поправки к сечению по передаче импульса конечному протону $d\sigma/dQ^2$. При помощи двух различных методов подробно исследован механизм такого сокращения:

1. Спектр тормозного излучения был проинтегрирован по частоте фотона. Таким способом были рассчитаны поправки с точностью до членов пропорциональных Q/E , где E – энергия налетающего электрона. При этом было показано, что сокращение имеет место не только с логарифмической точностью, но и для членов не содержащих коллинеарных расходимостей.
2. Проведенные методом структурных функций электрона исследования позволили не только подтвердить расчеты первого метода, но и получить

поправки пропорциональные Q^2/E^2 . В этом подходе сокращение логарифмических вкладов в радиационные поправки получило простое объяснение на языке функций «партонах» распределений.

В **заключении** изложены основные результаты и выводы проведённых исследований. В **приложениях** приведены формулы для расчета радиационных поправок в мягкофотонном приближении, а также для вычисления вклада Δ -изобары в радиационные поправки.

Таким образом, на основе выполненной серии теоретических расчетов соискателем были исследованы радиационные поправки к сечению упругого рассеяния электронов на протонах. **Впервые** был установлен факт сокращения главных вкладов в радиационные поправки к сечению $d\sigma/dQ^2$, подчеркивающий достоинства метода измерения зарядового радиуса протона путем измерения энергии протонов отдачи. Показано малое влияние эффекта возбуждения $\Delta(1232)$ на радиационные поправки, связанные с излучением реального фотона, что подтверждает результаты эксперимента ВЭПП-3 по измерению амплитуды ДФО.

Проделанная работа потребовала от диссертанта глубокого понимания квантовой электродинамики и ее методов. Соискатель продемонстрировал не только владение аналитическими методами теории и широкую эрудицию, но также и навыки проведения численных расчетов.

Диссертация написана четким и ясным языком, хотя в некоторых случаях присутствует некоторая фрагментарность изложения. В качестве замеченных недостатков можно указать также следующее. При обсуждении полученного в четвертой главе вывода о сокращении больших вкладов и малости результирующих поправок не содержится обсуждение вклада их возможной интерференции, что могло бы быть важным для особенно прецизионных измерений. Для улучшения понимания феноменологических приложений полученных результатов также желательно, например, было бы проиллюстрировать влияние поправок пропорциональных Q^2/E^2 в выражении 4.36 графически. Указанные недостатки не имеют принципиального значения для полученных результатов и никоим образом не снижают высокой оценки, которой заслуживает диссертационная работа Р.Е. Герасимова.

Рассматриваемая диссертация представляет собой законченное научное исследование, содержащее **важные результаты, представляющие научную новизну и большую практическую ценность для проведения прецизионных экспериментов по изучению зарядового радиуса протона, а также в измерениях вклада двухфотонного обмена в сечение электрон-протонного рассеяния**. Эти результаты докладывались на научных семинарах и конференциях; они своевременно опубликованы в реферируемых журналах.

Проделанные теоретические расчёты находятся в согласии с результатами расчётов приближенными методами (уточняют их). Главный вывод диссертационной работы получен двумя способами. **Таким образом, всё вышеуказанное подтверждает достоверность выводов диссертационной работы и положений, выносимых на защиту.**

Диссертация Р.Е. Герасимова является законченным научным трудом, выполнена на высоком научном уровне и посвящена важной и актуальной проблеме. Диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а её автор Р.Е. Герасимов безусловно заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 — теоретическая физика.

Диссертация Р.Е. Герасимова рассматривалась на объединенном семинаре Отделения физики высоких энергий (ОФВЭ) и Отделения теоретической физики (ОТФ) НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ 27 августа 2020 г., на котором были одобрены основные результаты диссертации и выводы данного отзыва.

Отзыв подготовили:

Научный руководитель ОФВЭ
НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ,
член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н.,
профессор


A.А. Воробьев
vorobyov_aa@pnpi.nrcki.ru

Заместитель руководителя ОФВЭ по
научной работе НИЦ «Курчатовский
институт» - ПИЯФ, д.ф.-м.н.


B.Т. Ким
kim_vt@pnpi.nrcki.ru

Заведующий лабораторией барионной
физики ОФВЭ НИЦ «Курчатовский
институт» - ПИЯФ,
к.ф.-м.н.


А.А. Дзюба
dzyuba_aa@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.

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


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