

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук Дорохова Александра Евгеньевича о диссертации **Герасимова Романа Евгеньевича** на тему «Радиационные поправки к сечению электрон-протонного рассеяния в экспериментах по изучению вклада двухфотонного обмена и измерению зарядового радиуса протона» на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 –теоретическая физика, представленной в диссертационный совет Д 003.016.02 на базе ФГБУН Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН.

Изучение структуры протона является фундаментальной проблемой физики элементарных частиц. За 70-летнюю историю это привело к большому числу важных открытий в познании физики сильных взаимодействий. В частности, это явилось основой для открытия Квантовой хромодинамики (КХД), одной из важнейших составляющих Стандартной Модели. Упругое электрон-протонное ( $e\text{-}$ ) рассеяние является классическим процессом для изучения внутренней структуры нуклонов посредством определения электромагнитных формфакторов нуклонов, как базисных феноменологических параметров. В течении длительного времени электрический ( $G_E(Q^2)$ ) и магнитный ( $G_M(Q^2)$ ) упругие формфакторы протона извлекались из экспериментов с неполяризованными частицами, используя метод Розенблюта (МР). В этих экспериментах было найдено, что отношение  $\mu_p G_E / G_M$ , где  $\mu_p$  – это магнитный момент протона, согласуется с 1 в широком диапазоне квадрата переданного импульса  $Q^2$  вплоть до  $8.83 \text{ ГэВ}^2$ . Начиная с 2000 года, в экспериментах, выполненных в Лаборатории Джефферсона (США), формфакторы протона были определены со значительно меньшими неопределенностями, используя метод передачи поляризации (ПП). Эти эксперименты обнаружили уменьшение отношения  $\mu_p G_E / G_M$  по линейному закону с ростом  $Q^2$  вплоть до  $8.5 \text{ ГэВ}^2$ , что оказалось в явном противоречии с предыдущими результатами.

Обычно, анализ данных электронного рассеяния методом Розенблюта проводился в одно-фотонном приближении. Возникшее противоречие мотивировало интенсивные исследования структурно-зависимых двух-фотонных радиационных поправок (ДФП) в надежде решить возникшую проблему. Для лучшего понимания значимости ДФП вкладов были использованы различные методы. Теоретические исследования основывались на факторизационном подходе в КХД, вычислениях с использованием обобщенных партонных распределений в протоне, дисперсионном методе, адронных моделях для вычисления реальной части ДФП амплитуды и других. В диссертации Р. Е. Герасимова выполнены оригинальные исследования по указанной выше теме: в работе дан анализ радиационных поправок (РП), которые необходимо учесть при прямом извлечении ДФП вклада в экспериментах, в которых измеряется зарядовая асимметрия  $e\text{-}$ рассеяния.

Другая важная тема, изученная в диссертации Р. Е. Герасимова, связана с извлечением радиуса протона. Имеется два стандартных способа извлечения радиуса протона: спектроскопия водорода и упругое ер-рассеяние при малых  $Q^2$ . Относительно недавно в Институте Пауля Шеррера (Швейцария) были выполнены эксперименты (группа профессора Р. Поля) по спектроскопии мюонного водорода. Из данных был извлечен радиус протона с точностью на порядок выше, чем это делалось из водородных данных. Однако новая величина на 5 стандартных отклонений отличалась от прежних значений. Возникшее противоречие вызвало бурную дискуссию и обильное число предложений по новым экспериментам с целью решить возникшую проблему. Одним из этих предложений (профессор А. А. Воробьёв, ПИЯФ, Гатчина, 2019) является эксперимент по измерению радиуса в ер-рассеянии в постановке с регистрацией протона отдачи. Во второй части диссертации Р. Е. Герасимова обсуждаются некоторые свойства РП для данного эксперимента.

Все это позволяет заключить, что тема диссертационной работы является **актуальной**.

**Научная новизна** проведенных исследований не вызывает сомнений. Отдельный класс РП для рассмотренных экспериментов посчитан впервые. Кроме того, некоторые поправки, изученные в ранних работах Мо-Тсяя и более поздней Максимова-Тьона, перепроверены на самосогласованность.

**Достоверность** полученных результатов подтверждается тем, что использованы стандартные, классические методы вычислений в квантовой электродинамике. Было проверено соответствие приближенных аналитических и численных результатов, а также проведен анализ частных случаев. Основу диссертации Р.Е. Герасимова составляют результаты теоретических работ, выполненных в соавторстве с профессором В. С. Фадиным, одним из мировых лидеров по проведению такого рода расчетов.

**Научная и практическая ценность** результатов работы обусловлена значимостью изучения структуры протона для физики элементарных частиц. Полученные результаты по РП для экспериментов, в которых измеряется зарядовая асимметрия, важны для прямого извлечения ДФП и решения проблемы по извлечению формфакторов протона МР и ПП методами. Радиационные поправки для эксперимента с ер-рассеянием в постановке с регистрацией протона отдачи важны для извлечения радиуса протона в рассеивательном эксперименте. Результаты работ диссертанта уже используются в различных научных центрах России и за рубежом.

Объем диссертационной работы составляет 105 страниц, включая 13 рисунков и 1 таблицу. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, двух приложений и списка литературы, включающего 88 наименований.

**Во введении** дан обзор текущего состояния исследований по теме диссертационной работы, обоснована актуальность и значимость проведенных исследований, сформулирована цель работы, изложены основные положения, выносимые на защиту, их научная новизна, приведен

список конференций, на которых представлены материалы диссертации, и список публикаций автора, на которых основана диссертация.

**В первой главе** определены формфакторы протона и их извлечение в неполяризационных (формула Розенблюта) и поляризационных экспериментах, приведены основные факты по упругому  $e$ -рассеянию при малых передачах импульса и сформулирована идея эксперимента, предложенного А. А. Воробьёвым. Эта глава носит вводный характер и ее содержание хорошо известно специалистам из многочисленных обзоров по данной тематике.

**Вторая глава** посвящена изучению РП к сечению упругого  $e$ -рассеяния. Основное внимание сконцентрировано на изучении формализма для постановки эксперимента по розенблютовскому разделению формфакторов. Конкретно рассмотрены выражения для РП, полученные в работе Мо и Тсая и позднее в работе Максимова и Тьона. Различия этих двух расчетов, основанных на приближении мягких фотонов, обусловлены разницей в учете вкладов диаграмм двухфотонного обмена и тормозного излучения, а также в вычислении виртуальной поправки к протонной вершине. В модели бесструктурного протона Р.Е. Герасимов указал несовершенство обоих расчетов вкладов отдельных диаграмм двухфотонного обмена и то, что эти недостатки в полных выражениях для вклада в виртуальные радиационные поправки «чудесным» образом компенсируются. В вычислениях реальных радиационных поправок автором подтверждается результат Максимова-Тьона и явным образом указывается на неточность в расчете Мо-Тсая. Полученные автором в этом разделе результаты представляют хороший педагогический материал для понимания РП к сечению упругого  $e$ -рассеяния.

**В третьей главе** обсуждается вклад  $\Delta(1232)$ -резонанса в РП, связанные с излучением реального фотона при различных постановках экспериментов. Мотивом этих вычислений стало, во-первых, предположение о важности учёта вкладов промежуточных резонансных состояний в амплитуду двухфотонного обмена (учёт жестких фотонов). Кроме того, эффекты ДФП могут быть прямо найдены из сравнения экспериментальных упругих сечений  $e$ - $p$ - и  $e^+$ - $p$ -рассеяния. Такие данные уже получены в Новосибирске (РФ), лаборатории Джефферсона (США) и ДЭЗИ (ФРГ). Р. Е. Герасимовым обсуждается процедура учёта РП в экспериментах такого типа и, в частности, определение вклада промежуточного  $\Delta(1232)$ -резонанса в реальные РП. Как важное приложение развитого формализма, обсуждается вклад  $\Delta(1232)$  в РП в условиях эксперимента на накопителе ВЭПП-3 (Новосибирск).

**Четвёртая глава** посвящена изучению РП в экспериментах по  $e$ -рассеянию при очень малых  $Q^2$ , которые используются для извлечения радиуса протона. Замечательный результат, обнаруженный Р. Е. Герасимовым состоит в том, что происходит существенное сокращение лидирующих вкладов в РП для эксперимента, предложенного А. А. Воробьёвым, по измерению радиуса протона в  $e$ -рассеянии в условии регистрации протона отдачи. В частности показано, что в кинематике такого эксперимента происходит сокращение в однопетлевом приближении главных вкладов в РП

с логарифмической точностью, а также с точностью до константных членов (членов, которые не содержат коллинеарных логарифмов). Причем последнее утверждение доказано с использованием двух альтернативных способов: с использованием спектра тормозного излучения и методом структурных функций. На основе метода партонных распределений Грибова-Липатова приведены аргументы в пользу сокращения РП и в более высоких порядках теории возмущений, по крайней мере, с логарифмической точностью.

**В заключении** перечислены основные результаты, полученные в работе.

В целом диссертация написана подробно, ясно, хорошо проиллюстрирована рисунками и таблицами. Большинство вычислений выполнено разными способами, имеющими различную степень приближенности. К тексту диссертации имеется ряд **замечаний**, в качестве которых можно отметить следующие:

1. Из текста диссертации не вполне ясно, насколько существенно влияют различия между традиционным (Мо-Тсая) и более поздним (Максимон-Тъена) расчетами РП на результаты экспериментов по розенблютовскому разделению формфакторов.
2. В части, посвященной изучению электронного вклада в РП для эксперимента по измерению зарядового радиуса протона, была бы полезна информация об остальных вкладах в радиационные поправки, насколько важными могут оказаться они на фоне малого остаточного электронного вклада.
3. В списке литературы, касающейся радиационных поправок и их сокращения в определенных процессах, для полноты было неплохо отметить работы, выполненные в ОИЯИ, Дубна, в частности А.Б. Арбузовым и другими.
4. Есть некоторые неточности в тексте диссертации. Например, энергетический интервал в эксперименте JLAB указан не вполне точно, на стр. 59 неправильное согласование «вклады» вместо «вкладов». Ссылки [35] и [79] относятся к одной и той же работе.

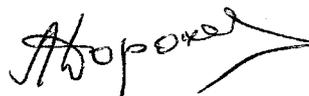
Отмеченные недостатки не влияют на значимость результатов, описанных в диссертации.

Текст автореферата соответствует содержанию диссертации. По теме диссертации опубликовано 4 статьи в ведущих российских и международных журналах. Работы, на основании которых написана диссертация, широко цитируются в научной литературе. Результаты диссертации могут быть использованы при анализе ведущихся и планировании будущих экспериментов по ер-рассеянию как в российских ИЯФ (Новосибирск), так и в зарубежных JLAB (USA), Mainz (Germany) научных центрах физики высоких энергий.

Представленная диссертационная работа Герасимова Романа Евгеньевича «Радиационные поправки к сечению электрон-протонного рассеяния в экспериментах по изучению вклада двухфотонного обмена и измерению зарядового радиуса протона» является законченным научным

исследованием и удовлетворяет всем требованиям ВАК к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических и критериям, установленным в пункте 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, а ее автор Роман Евгеньевич Герасимов, безусловно, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Официальный оппонент  
доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник  
сектора №5 Научного отдела теории фундаментальных взаимодействий  
Лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова  
Объединенного института ядерных исследований  
Дорохов Александр Евгеньевич



Контактные данные:  
тел.: +7(49621) 6-27-30, e-mail: dorokhov@theor.jinr.ru  
Специальность, по которой защищена диссертация:  
01.04.02 – Теоретическая физика

Адрес места работы:  
141980, Россия, Московская обл., г. Дубна, ул Жолио-Кюри, д. 6,  
Международная межправительственная организация  
Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория теоретической  
физики им. Н.Н. Боголюбова

Подпись сотрудника  
Объединенного института  
ядерных исследований  
*Дорохов А.Е.*  
УДОСТОВЕРЯЕТСЯ  
01 СЕН 2020

