

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Герасимова Романа Евгеньевича “Радиационные поправки к сечению электрон-протонного рассеяния в экспериментах по изучению вклада двухфотонного обмена и измерению зарядового радиуса протона”, представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 — теоретическая физика.

Актуальность исследования

Как можно определить место, которое занимает теоретическая диссертация Романа Евгеньевича Герасимова? Для этого будет уместно напомнить следующее.

Во вводном докладе “Феномен и физическая реальность”, представленном на симпозиуме Международного философского конгресса, состоявшемся в Цюрихе в 1954 году, его автор Вольфганг Паули заметил по поводу взаимодействия электронов очень высокой энергии с атомными ядрами, что теория, с помощью которой обрабатываются эмпирические результаты и получаются данные о создаваемом протонами распределении электрического заряда в ядре, “довольно хороша”. Однако Паули подчеркнул, что “полученное таким путём распределение заряда не следует из существующей теории”. Оба заключения можно напрямую отнести и к взаимодействию электронов с протонами. Для измерения электрического (G_E) и магнитного (G_M) формфакторов протона имеются два “довольно хороших” инструмента. Первый — это метод, использующий данные об угловой зависимости неполяризованного упругого сечения *ep*-рассеяния, предложенный Розенблютом (1950 г.). Второй метод основан на измерениях поляризации протонов отдачи в опытах по *ep*-рассеянию с поляризованными электронными пучками, предложенный Ахиезером и Рекало (1968 г.). В начале 2000-х выяснилось, что розенблютовский и поляризационный методы приводят к существенно разным результатам для отношения формфакторов G_E/G_M при значениях квадрата переданного протону импульса $Q^2 > 2 \text{ GeV}^2$. Этот дискрипанс явился серьёзной проблемой, так как породил путаницу и неуверенность в общей методологии экспериментов по рассеянию лептонов на нуклонах. Для выяснения причин противоречия были предприняты дополнительные экспериментальные и теоретические усилия, которые с нарастающей интенсивностью велись в последнее десятилетие и продолжаются сейчас. Вопрос до сих пор окончательно не решён. Он представляет большой интерес. И в этой связи диссертация Р.Е. Герасимова вносит важный вклад в понимание современной ситуации с данными по электромагнитным формфакторам протона. Дело в том, что всесторонний анализ вкладов радиационных поправок в сечения электрон-протонного рассеяния, которые зависят от конкретной постановки опыта, может стать ключом к разрешению противоречий. И конечно, дискрипанс должен быть разрешён до проведения детального сравнения между моделями, претендующими на описание структуры протона, и данными по формфакторам.

Кроме того, диссертация Р.Е. Герасимова имеет также прямое отношение к разрешению ещё одного загадочного противоречия (называемого “загадкой протонного радиуса”) между данными по зарядовому радиусу протона, полученными в

прецизионных опытах по ep -рассеянию и спектроскопических экспериментах с электронным и мюонным водородом.

Об основных результатах работы её автор докладывал на целом ряде российских и международных конференций, труды которых опубликованы в том числе в периодических научных изданиях. Из всего сказанного выше следует, что тема диссертации связана с животрепещущими вопросами физики высоких энергий и, безусловно, является современной и актуальной.

Достоверность исследования

В диссертации проводится подробный анализ всех основных типов радиационных поправок к сечению упругого ep -рассеяния. Значительное внимание уделено вычислению радиационных поправок от тормозного излучения, учитывающему вклад от $\Delta(1232)$ -резонанса. Представленные в диссертации результаты уже стали практически значимыми. Он были использованы для обработки данных эксперимента по измерению отношения сечений электрон-протонного и позитрон-протонного рассеяния, выполненного на накопителе ВЭПП-3 в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН в Новосибирске. В последнее время большой интерес вызывают результаты прецизионных экспериментов по измерению зарядового радиуса протона. В диссертации исследуется интересное свойство одного из таких экспериментов по упругому ep -рассеянию в постановке с регистрацией протона отдачи, а именно, сокращение главных вкладов в радиационные поправки к дифференциальному по передаче импульса протону сечению рассеяния — факт, который будет важен при обработке данных.

В диссертации использовались современные методы численных и аналитических вычислений в рамках квантовой электродинамики. Диссертация написана ясным языком. Изложение хорошо продумано. Акценты чётко расставлены. Результаты диссертации опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах, таких как Ядерная физика, Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics и Physics Letters B. Таким образом, можно сделать однозначный вывод о **достоверности исследования** и высокой степени обоснованности научных результатов, представленных в диссертации.

Научная новизна работы

В целом диссертация Р.Е. Герасимова представляет собой существенный законченный этап исследований в области теоретической физики, имеющий **научную ценность**. В ней получены **оригинальные результаты**, находящиеся на современном **мировом уровне**. В диссертации автор продемонстрировал владение обширным набором **современных** методов теоретической физики высоких энергий, направленных на всестороннее изучение радиационных поправок к процессам рассеяния лептонов на адронах.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и нескольких приложений. Она хорошо иллюстрирована рисунками.

Во **Введении** обосновывается важность и актуальность вычислений и анализа радиационных поправок к сечениям процессов упругого рассеяния электронов и позитронов на протонах для разных постановок экспериментов. Обращается

внимание на запутывающее многообразие нестыковок в данных различных опытов по формфакторам протона и его зарядовому радиусу. Формулируется цель диссертации, а также её теоретическая и практическая значимость. Представлены основные результаты, которые выносятся на защиту.

В начале **первой главы** рассказывается о методе Розенблюта по разделению электромагнитных формфакторов протона G_E^2 и G_M^2 и возникающих в рамках этого метода ограничениях на точность определения отношения G_E/G_M . Далее описывается способ измерения отношения G_E/G_M в экспериментах с поляризованными частицами. Обращается внимание на явное противоречие результатов поляризационных экспериментов с результатами экспериментов по розенблютовскому разделению формфакторов. В заключительном разделе этой главы обсуждается упругое *ep*-рассеяние при передачах импульса малых по сравнению с массой протона и готовящийся новый эксперимент по измерению зарядового радиуса протона с точностью, способный разрешить “загадку протонного радиуса”. Таким образом в этой главе представлен весьма полный обзор очень проблемной ситуации, сложившейся к настоящему времени в исследованиях электромагнитных формфакторов протона.

Отмечу, что в начале раздела 1.3 на стр. 17 была бы весьма к месту формула, явно выражаяющая связь между углом рассеяния электрона и передачей импульса протону отдачи.

Во **второй главе** детально описана процедура учёта главных радиационных поправок к сечению упругого *ep*-рассеяния. Важнейшими особенностями этой процедуры являются необходимость работы с расходящимися вкладами от “мягких” фотонов, модельная зависимость расчётов, выходящих за рамки мягкофотонного приближения, и зависимость вклада тормозного излучения от конкретной постановки эксперимента. Для поправок к протонной вершине приведены доводы в пользу того, чтобы при обработках данных придерживаться стандартного мягкофотонного приближения и прескрипции Мо и Тсая. В этой главе автором впервые проведён исчерпывающий анализ двух основных подходов к вычислению радиационных поправок к сечению электрон-протонного рассеяния, основанных на мягкофотонном приближении. Установлено, что для вклада диаграмм двухфотонного обмена оба подхода дают адекватное приближение к точному расчёту амплитуды рассеяния для случая точечного протона. В части расчётов радиационных поправок, связанных с излучением реального фотона, автор подтверждает результаты более современного подхода и указывает на найденное им слабое место в более традиционной процедуре вычислений. Анализ приближений, используемых при вычислении радиационных поправок к сечению электрон-протонного рассеяния, представленный в этой главе, производит целое впечатление.

Чтобы не загромождать изложение длинными промежуточными формулами, автор удачно вынес часть подробных расчётов в Приложения. Но так как Приложений много, то в тексте следовало бы использовать ссылки на них типа “см. Приложение А.3” и т.п., а не просто “см. Приложение”.

Третья глава посвящена расчёту возможного вклада от резонанса $\Delta(1232)$ в радиационные поправки, связанные с излучением реального фотона, для различных постановок экспериментов с магнитным спектрометром. В начале автор обсуждает

вклад “жёстких” фотонов в амплитуды двухфотонного обмена, в которые наряду с виртуальным протоном дают вклады $\Delta(1232)$ -резонанс и другие ещё более тяжёлые резонансы. Высказывается надежда на то, что учёт таких вкладов может приблизить результаты по розенблютовскому разделению формфакторов протона к результатам поляризационных экспериментов. На опыте эффекты двухфотонного обмена могут быть извлечены путём сравнения упругих сечений рассеяния электронов и позитронов на протонах. Один из таких опытов был выполнен на накопителе ВЭПП-3 в ИЯФ-е, где вклад “жёсткой” части амплитуды двухфотонного обмена был обнаружен на уровне 1%. Р.Е. Герасимов принимал непосредственное участие в проведении этого эксперимента и, в частности, в написании монте-карловского генератора событий для сечений $e^\pm p$ -рассеяния. Для обработки данных ВЭПП-3 требовалось вычисления вклада радиационных поправок с учётом возбуждения $\Delta(1232)$ -резонанса. Этот нетривиальный вклад был получен Романом Евгеньевичем с использованием приближённых аналитических методов и численного интегрирования. Аккуратное вычисление, учитывающее условия эксперимента(!) на накопителе ВЭПП-3, показало, что он не может повлиять на величину отношения сечений рассеяния электронов и позитронов на протонах, измеренную в ИЯФ-е. Соответствующий вклад оказывается пренебрежимо мал и для экспериментов по измерению упругого ep -рассеяния с магнитным спектрометром.

Четвёртая глава диссертации посвящена расчётом радиационных поправок в экспериментах по измерению зарядового радиуса протона в реакции упругого ep -рассеяния в области малых переданных импульсов. Недавно для разрешения загадки протонного радиуса был предложен новый эксперимент по ep -рассеянию в постановке с регистрацией протона отдачи. Р.Е. Герасимов показал, что такая постановка эксперимента обладает неожиданным и замечательным свойством, характеризующимся сокращением главных вкладов в радиационные поправки к дифференциальному по передаче импульса протону сечению упругого рассеяния. Им указана причина и представлено теоретическое описание механизма этого сокращения с помощью различных методов и с различной степенью точности, а также в зависимости от дополнительных экспериментальных условий. В однопетлевом приближении получено сокращение не только членов, усиленных колинеарными логарифмами, но и следующих константных членов. Показано, что остаточный вклад в радиационные поправки от взаимодействия электрона с электромагнитным полем подавлен первой степенью отношения величины переданного импульса к энергии начального электрона. Проведённое в этой главе исследование важно для выбора конкретных условий постановки эксперимента по измерению зарядового радиуса протона и его последующей обработки.

В **Заключении** кратко перечислены основные результаты, полученные в диссертации.

Прежде чем подвести итог, приведу пару технических замечаний.

1. Автор отмечает, что выделение из амплитуды двухфотонного обмена вкладов, отвечающих отдельным диаграммам, не однозначно, так как оно зависит от выбора калибровки. В связи с этим неясно, какой физический смысл имеют рассуждения, основанные на вычислениях с использованием фейнмановской калибровки, о недостатках двух вариантов мягкофотонного приближения на языке разностей между их вкладами по отдельности в box - и $xbox$ -диаграммы и вкладами,

отвечающими соответствующему точному расчёту.

2. После прочтения диссертации и знакомства с сопутствующей литературой у меня сложилось впечатление о существовании негласного табу на упоминание, обсуждение и расчёт поправок от вкладов двухфотонных треугольных диаграмм. Я имею в виду диаграммы на которых протон обменивается с электроном в t -канале C -чётными мезонами (скалярными, псевдоскалярными, тензорными, аксиально-векторными и т.д.), которые взаимодействуют с электроном за счёт переходов в пару фотонов. Возможно, что это впечатление неверно и указанные вклады по какой-то причине заведомо очень малы? Однако упомянуть о такого sorta поправках, мне кажется, в любом случае стоило.

Указанные выше замечания не влияют на научную значимость результатов, полученных в диссертации.

Хочу в заключение специально отметить высокую культуру сложных расчётов, проделанных в диссертации Романом Евгеньевичем Герасимовым, а также ещё раз подчеркнуть несомненную злободневность представленной работы. То, что перед нами живое интересное направление исследований, подтверждается подготовкой новых прецизионных экспериментов по ер-расщеплению сразу в нескольких международных ускорительных лабораториях, а также появлением новых теоретических исследований механизма двухфотонного обмена, направленных на разрешение проблемы формфакторов протона.

Основные результаты диссертации опубликованы в научных изданиях, соответствующих списку ВАК РФ, они хорошо известны специалистам в области физики высоких энергий как теоретикам, так и экспериментаторам, и докладывались автором на целом ряде российских и международных конференций. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, диссертация Герасимова Романа Евгеньевича является законченной научной работой, она удовлетворяет всем требованиям (п.9, 11, 14), которые предъявляет ВАК РФ к кандидатским диссертациям, и её автор безусловно заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 — теоретическая физика.

Официальный оппонент,
доктор физ.-мат. наук, доцент
лаборатория теоретической физики
Института математики им. С.Л. Соболева
Сибирского Отделения РАН
630090, г. Новосибирск, пр. ак. Коптюга
e-mail: shestako@math.nsc.ru
телефон: 8(383)3297612

Отзыв Г.Н. Шестакова заверяю
Учёный секретарь ИМ СО РАН
кандидат физ.-мат. наук
28 августа 2020 г.



Г.Н. Шестаков

И.Е. Светов