

ОТЗЫВ

официального оппонента, Потылицына Александра Петровича, 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

В диссертационной работе А. В. Грамолина изучается эффект жесткого двухфотонного обмена в упругом рассеянии электронов и позитронов на протонах, а также детально рассматриваются радиационные поправки к этим процессам. Начиная с пионерских экспериментов Роберта Хофштадтера, отмеченных в 1961 году Нобелевской премией по физике, упругое электрон-протонное рассеяние используется для исследования электромагнитной структуры протона. При этом измеряются его электрический и магнитный формфакторы, $G_E(Q^2)$ и $G_M(Q^2)$, которые зависят только от квадрата переданного ему при рассеянии четырех-импульса, Q^2 , и характеризуют пространственное распределение заряда и магнитного момента внутри протона. Традиционный подход, который получил название метода Розенблюта, основан на измерении дифференциального сечения упругого рассеяния неполяризованных электронов на неполяризованной протонной мишени. Хотя еще в 1960-х годах было предложено использовать поляризованный пучок электронов и измерять отношение G_E/G_M через поляризационные наблюдаемые реакции, на практике это было реализовано только в 2000-х годах. Серия таких экспериментов, проведенная в Лаборатории Джефферсона в США, принесла неожиданные результаты, противоречащие данным, полученным с помощью метода Розенблюта. Было обнаружено, что отношение G_E/G_M быстро падает с ростом Q^2 , тогда как ранее считалось, что оно слабо зависит от передачи импульса. Наиболее правдоподобным объяснением этого противоречия считается неучтенный в методе Розенблюта эффект жесткого двухфотонного обмена — процесса, в котором электрон и протон взаимодействуют путем обмена не одним, а сразу двумя виртуальными фотонами. Поскольку вклад двухфотонного обмена в дифференциальное сечение зависит от знака заряда рассеиваемой частицы, этот эффект может быть изучен при сравнении электрон-протонного и позитрон-протонного рассеяния. Именно такой эксперимент, проведенный на накопительном кольце ВЭПП-3 в новосибирском Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера, и описан в диссертации. Поскольку данное исследование связано с важной и еще нерешенной проблемой формфакторов протона, его **актуальность** не вызывает сомнений.

Диссертация А. В. Грамолина состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Она изложена на 120 страницах и включает в себя 21 рисунок и 9 таблиц. Список цитируемой литературы из 137 наименований в полной мере охватывает как классические, так и современные работы по теме диссертации.

Во введении формулируются цель работы и выносимые на защиту положения, обосновываются научная новизна исследования, его теоретическая и практическая значимость, обсуждаются достоверность полученных результатов и их апробация.

В первой главе дан обзор материала, важного для понимания последующих глав. Здесь рассмотрены кинематика процесса упругого электрон-протонного рассеяния, его дифференциальное сечение в приближении однофотонного обмена, изложена интерпретация формфакторов G_E и G_M в системе отсчета Брейта. Приведены экспериментальные данные для формфакторов протона, полученные с помощью двух разных методов, и обсуждается противоречие между ними.

Вторая глава посвящена учету радиационных поправок в экспериментах по упругому электрон-протонному рассеянию, в которых регистрируется только рассеянный электрон. Здесь рассмотрены как традиционно используемые формулы, так и уточнения к ним, позволяющие лучше учесть поляризацию вакуума, внутреннее и внешнее тормозное излучение, а также ионизационные потери.

В третьей главе описана переобработка данных экспериментов E140 и NE11 по измерению формфакторов протона, проведенных в Стэнфордском центре линейного ускорителя (SLAC) в 1990-е годы. В частности, по формулам из второй главы диссертации были заново вычислены и применены все радиационные поправки. Процедура извлечения электрического и магнитного формфакторов протона также отличалась от стандартной методики розенблютовского разделения, использованной в оригинальных работах. По результатам проведенного анализа диссертант делает вывод, что противоречие между поляризационными и неполяризационными данными для отношения G_E/G_M не может быть объяснено неточностями при учете стандартных радиационных поправок в методе Розенблюта.

В четвертой главе диссертации рассмотрена процедура учета радиационных поправок низшего порядка по α в экспериментах по упругому рассеянию заряженных лептонов на протонах с регистрацией продуктов реакции на совпадении. Достоинством представленного подхода является то, что при рассмотрении тормозного излучения не используются ни мягкофотонное, ни ультрарелятивистское приближения, к которым часто прибегают в других работах. Также описан разработанный диссертантом новый универсальный генератор событий упругого лептон-протонного рассеяния, включающий в себя радиационные процессы первого порядка по α . Поскольку исходный код генератора находится в свободном доступе, он может быть использован для проведения компьютерного моделирования и учета радиационных поправок во многих будущих экспериментах.

В пятой главе обсуждается проведенный недавно на накопителе ВЭПП-3 в Новосибирске эксперимент по изучению эффекта жесткого двухфотонного обмена в упругом $e^\pm p$ -рассеянии. Эксперимент заключался в прецизионном сравнении между собой дифференциальных сечений упругого электрон-протонного и позитрон-протонного рассеяния. Описана постановка эксперимента, процедура анализа экспериментальных данных (включая учет стандартных радиационных поправок) и подробно обсуждаются полученные результаты. Важнейшим достижением работы является первое прямое наблюдение эффекта жесткого двухфотонного обмена.

В заключении приведены основные полученные результаты.

Материалы диссертации **опубликованы** в виде 9 статей в рецензируемых научных журналах, включая такие известные, как «Physical Review Letters», «Physical Review C»,

«Journal of Physics G» и «Ядерная физика». Они неоднократно докладывались диссертантом на международных конференциях и известны научному сообществу. Результаты эксперимента на накопителе ВЭПП-3 уже процитированы в нескольких десятках статей, включая обзорные. Они согласуются с данными двух конкурирующих экспериментов, CLAS и OLYMPUS, но превосходят их по точности. Все это свидетельствует о **достоверности** и **значимости** полученных результатов. Их **научная новизна** обеспечивается тем, что было проведено самое точное на сегодняшний день сравнение дифференциальных сечений упругого e^-p - и e^+p -рассеяния при $Q^2 \approx 1 \text{ ГэВ}^2$ и осуществлено первое прямое наблюдение эффекта жесткого двухфотонного обмена в этих процессах. Также был разработан новый генератор событий упругого рассеяния заряженных лептонов на протонах, в котором учтены радиационные поправки первого порядка по α , а тормозное излучение моделируется без использования мягкофотонного и ультрарелятивистского приближений.

Диссертация написана понятным и грамотным языком, имеет продуманную логическую структуру, сопровождается качественными рисунками и таблицами. Ее научные положения **хорошо обоснованы** и представляются достоверными. В тексте диссертации не было замечено орфографических и пунктуационных ошибок. Тем не менее, к ней имеется несколько **критических замечаний**, представленных ниже.

- 1) В разделе 2.5 автор использует формулу (2.26), описывающую тормозное излучение в различных материалах через параметры b_i , b_f . В эксперименте на ВЭПП-3 начальный и рассеянный электрон проходит через один и тот же материал, т.е. $b_i = b_f$ (см. формулу (2.28)), однако в результирующей формуле (2.31) вновь фигурируют различные значения b_i и b_f .
- 2) В формулах (4.8), (4.14) используется угол ψ , который, для последовательности изложения должен быть выражен через "входные" кинематические переменные (через углы θ_5 , ϕ_5).
- 3) На стр. 54 введена функция $\Theta(p_1)$ для обозначения заряда частицы, которая различается для начального и рассеянного протонов $\Theta(p_1) = -1$; $\Theta(p_3) = +1$. Автор должен был объяснить это различие.
- 4) На стр. 98 указывается, что "... рис. 5.8 иллюстрирует высокую чувствительность радиационных поправок к параметру $\Delta\phi = \Delta\theta$ ".

Однако в тексте диссертации не поясняется почему критерии (5.19), (5.20) должны совпадать и каким будет отношение сечений, если $\Delta\phi \neq \Delta\theta$.

Высказанные замечания носят частный характер и нисколько не снижают ценности диссертационной работы. Она представляет собой законченное научное исследование, в котором были получены оригинальные результаты, имеющие **теоретическую и практическую значимость** как для разрешения актуальной проблемы формфакторов протона, так и для будущих экспериментов по измерению электромагнитных формфакторов протона и его зарядового радиуса методом Розенблюта. Тема диссертации соответствует специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц, а ее основное содержание правильно и полностью отражено в **автореферате**.

Заключение: диссертация Грамолина Александра Валерьевича «Изучение двухфотонного обмена и анализ радиационных поправок в эксперименте по упругому рассеянию электронов и позитронов на протонах» полностью соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям (пп. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г.), а ее автор, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук,
профессор,
Потылицын Александр Петрович,
Ведущий научный сотрудник, профессор
Кафедры прикладной физики
Национального исследовательского
Томского политехнического университета



Адрес: 634050, г. Томск, проспект Ленина, д. 30

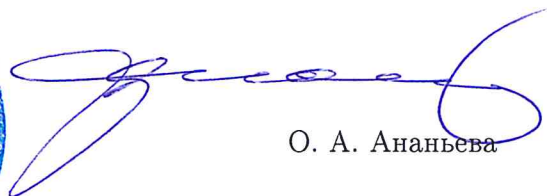
Телефон: 8 (3822) 70-18-28

E-mail: potylitsyn@tpu.ru

« 29 » мая 2017 г.

Подпись А. П. Потылицына заверяю:

Ученый секретарь ТПУ



О. А. Ананьева