

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук Арбузова А.Б., о диссертации **Грамолина Александра Валерьевича** на тему "Изучение двухфотонного обмена и анализ радиационных поправок в эксперименте по упругому рассеянию электронов и позитронов на протонах" на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц, представленной в диссертационный совет Д 003.016.02 на базе ФГБУН Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

В настоящее время исследования физических явлений проводятся со всëй большей и большей точностью. Постоянно совершенствуется и методика проводимых экспериментов. Рассматриваемая диссертация представляет собой пример исследования важной актуальной физической задачи, проведенного на самом высоком научном уровне. Объектом исследования был выбран процесс упругого рассеяния электронов и позитронов на протонах. Конкретно, была поставлена и успешно решена задача определения вклада двухфотонного обмена в этот процесс. В результате осуществлено первое прямое экспериментальное наблюдение данного вклада. Эти результаты очень важны и актуальны в связи с имеющимися в литературе противоречиями в результатах различных исследований по определению таких фундаментальных физических наблюдаемых, как электромагнитные формфакторы протона и его зарядовый радиус. **Актуальность** и значимость темы диссертационной работы не вызывает сомнений.

Научная и практическая ценность проведенных автором диссертации исследований несомненна. В диссертации подробно представлено завершенное научное исследование, давшее значительные результаты для физики элементарных частиц. Результаты диссертации могут быть использованы при проведении дальнейших экспериментальных и теоретических исследований в области физики элементарных частиц, проводимых в ИЯФ СО РАН, ОИЯИ (Дубна), ИФВЭ (Протвино), ИЯИ РАН (Москва) и других российских и зарубежных научных центрах. **Новизна результатов** диссертации очевидна. Действительно, проведено первое и, к тому же, высокоточное прямое наблюдение квантового эффекта, значимого для решения актуальной физической проблемы. Значимость и новизна результатов подтверждается уже имеющимся высоким уровнем цитирования статей, опубликованных по материалам диссертации.

Обоснованность полученных результатов обусловлена тем, что при выполнении программы исследований применялись современные методы анализа экспериментальных данных, отработанные при решении аналогичных задач. В то же время диссертацию можно рассматривать как некоторый шаг в развитии и совершенствовании этих методов. Действительно, решалась сложная комплексная задача по одновременному учету множества физических эффектов, каждый из которых оказывал влияние на конечный результат. **Достоверность** полученных результатов не вызывает сомнений. Необходимо отметить, что **личный вклад** А.В. Грамолина в исследованиях, отраженных в диссертации, был определяющим.

Диссертация состоит из Введения, пяти Глав, Заключения и списка литературы.

Во **Введении** обсуждается современный статус исследования электромагнитных характеристик протона, формулируются задачи исследования и методы их решения. Здесь также приведены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой Главе** вводятся основные обозначения для описания кинематики электрон-протонного упругого рассеяния и обсуждается интерпретация дифференциальных распределений в терминах электромагнитных формфакторов протона. **Вторая Глава** посвящена обсуждению радиационных поправок к процессу с регистрацией только рассеянного электрона. Выполнен анализ имеющихся в литературе подходов к их учету. Приведены уточненные формулы для учета поляризации вакуума, тормозного излучения и ионизационных потерь. В **третьей Главе** автор проводит новый анализ (ревизию) экспериментальных данных экспериментов E140 и NE11, выполненных в SLAC, с улучшенным учетом эффектов радиационных поправок. Полученные в итоге результаты для формфакторов протона лучше согласуются с данными поляризационных измерений при небольших передачах импульса ($Q^2 < 3 \text{ ГэВ}^2$). Вклады радиационных поправок для эксклюзивной постановки эксперимента обсуждаются в **четвертой Главе**. Здесь же описана компьютерная программа ESEPP, которую можно использовать для симуляции рассматриваемого процесса в широком диапазоне экспериментальных условий. Создание данной программы является одним из важнейших результатов диссертации. В **пятой Главе** описано проведенное на накопителе ВЭПП-3 при непосредственном участии автора экспериментальное сравнение сечений электрон-протонного и позитрон-протонного рассеяния. Подробно описана методика проведения эксперимента, представлен анализ систематических и статистических погрешностей. Особо следует отметить то, что достигнута действительно самая высокая в мире на настоящий момент относительная точность измерений (лучше 1%) для этих процессов. Такая высокая точность позволила утверждать, что впервые проведено прямое измерение эффекта двухфotonного обмена. В **Заключении** суммируются основные результаты проведенных исследований. Они соответствуют положениям, выносимым на защиту.

Диссертация написана хорошим языком, практически без опечаток и с приведением всех необходимых формул. Численные результаты представлены в виде таблиц и графиков. Проведенные исследования описаны подробно, с обоснованием основных положений и аккуратным цитированием использованной литературы. Показано хорошее знание современного состояния исследований в данной области, и на данном фоне ясно видна новизна и значимость проведенных исследований.

По содержанию диссертации есть следующие **замечания**.

- 1) На стр. 9 говорится, что в диссертации будет рассматриваться только лабораторная система отсчета, тогда как далее по тексту в разделе 1.3 на стр. 15 используется также и система Брейта.
- 2) На стр. 12 говорится, что формфакторы Дирака и Паули являются вещественными функциями. Вообще говоря, это утверждение верно не для всей области определения этих функций.
- 3) На стр. 27 обсуждаются варианты пересуммирования поправок за счет поляризации вакуума в высших порядках. При этом говорится, что экспоненцирование вклада первого порядка оправдано тем, что сама эта поправка невелика по сравнению с другими экспоненцируемыми членами. На самом же деле, эта поправка совсем не

мала, просто результат экспоненцирования близок численно к значению, получаемому при суммировании соответствующей геометрической прогрессии. При этом последний вариант пересуммирования лучше обоснован.

4) Одним из важных результатов диссертации является выход за рамки ультра-релятивистского приближения при описании тормозного излучения, т. е. в этих вкладах учтена точная зависимость от массы электрона. Однако вклады виртуальных поправок использованы в приближении малой массы электрона. Для рассматриваемой задачи несогласованность использования двух разных приближений в суммируемых вкладах не важна, поскольку масса электрона на много порядков меньше энергии пучка. Однако для использования созданной автором диссертации программы для случая упругого мюон-протонного рассеяния будет необходим выход за рамки ультра-релятивистского приближения и для виртуальных поправок. Об этом следовало бы более четко сказать в диссертации.

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертации.

В целом, диссертация представляет собой законченное научное исследование – научно-квалификационную работу, в которой содержится решение задачи, имеющей существенное значение для физики элементарных частиц. Объем и полнота проведенных исследований в рамках поставленной задачи впечатляют. Основные результаты диссертации докладывались на международных конференциях и своевременно опубликованы в ведущих российских и международных научных журналах.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Могу с уверенностью утверждать, что рассматриваемая работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК и Минобрнауки РФ к кандидатским диссертациям, а ее автор, Грамолин Александр Валерьевич, безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Официальный оппонент: *Арбузов*

Арбузов Андрей Борисович

заместитель директора Лаборатории
теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова
Объединенного института ядерных исследований,
д.ф.-м.н., без звания, профессор РАН
ул. Жолио-Кюри, д. 6, г. Дубна, 141980, Московская обл.
тел.: 8 (496) 216-33-43
e-mail: arbuzov@theor.jinr.ru

24.05.2017

Подпись официального оппонента заверяю:
Ученый секретарь ЛТФ ОИЯИ

А.В.Андреев

