

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента доктора физико-математических наук  
**Николаева Николая Николаевича**  
на диссертационную работу  
**Крачкова Петра Александровича**  
**«Исследование процессов квантовой электродинамики  
в сильных атомных полях при высоких энергиях»,**  
представленную в диссертационный совет Д003.016.02  
федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.02 — теоретическая физика

### **Актуальность работы:**

Интерпретация прецизионных экспериментальных данных требует адекватного роста точности теоретических предсказаний --- это аксиома. В квантовой электродинамике уточнение теоретического описания гарантирует не просто высокую точность предсказаний, но приводит сверх того и к новым явлениям, в частности, к спиновым эффектам и к зарядовым асимметриям спектров конечных электронов и позитронов. Классический пример из учебников --- появление спин-орбитального взаимодействия с правильной Томас-Френкелевской половинкой при переходе от гамильтониана Паули к гамильтониану Дирака. Обсуждаемая диссертационная работа Петра Александровича Крачкова «Исследование процессов квантовой электродинамики в сильных атомных полях при высокой энергии» есть пример решения на новом уровне ряда задач высокой актуальности, важных для интерпретации экспериментов на электрон-позитронных коллайдерах, по фоторождению и по упругому рассеянию электронов на тяжелых ядрах.

### **Новизна подхода и основные результаты:**

Рассмотренные в диссертационной работе П.А. Крачкова задачи --- процессы в сильных полях тяжелых атомов --- не допускают привычную трактовку в рамках теории возмущений. Рабочий аппарат в этой непертурбативной области --- это квазиклассический подход, который зародился более 30 лет тому назад именно в теоретическом отделе ИЯФ им. Будкера, в основоположниках подхода В.М.

Страховенко и А.И. Мильштейн, научный руководитель диссертанта и развивался он далее ими и их учениками.

И тут я позволю себе небольшой, но уместный важный экскурс в известную этому диссертационному совету тему. Группа физиков из Майнца с участием опять же очень известного в ИЯФ теоретика по спиновым явлениям Х. Аренховеля опубликовала не так давно предсказание гигантского спин-флипового сечения в электрон-протонном рассеянии. Когда вскорости А.И. Мильштейн с соавторами предъявили фактически аналитический ответ для этого сечения и показали, что в Майнце ошиблись на 16 порядков, то другой известный теоретик Г. Баур, много занимавшийся расчетами электромагнитных процессов в столкновениях ядер при высокой энергии, сказал при обсуждении этого результата с автором отзыва: «Никто кроме Мильштейна с соавторами посчитать такое не смог бы, так как только в Новосибирске умеют работать с кулоновской функцией Грина.»

Первая новизна диссертационной работы П.А. Крачкова - последовательный вывод первой квазиклассической поправки к функции Грина в главе 1 диссертации. Результат, уравнение 1.15 диссертации, представлен в удобном для приложений замкнутом виде. Ответ для функции Грина использован затем для вывода с адекватной точностью квазиклассических сходящихся и расходящихся волн. Вывод П.А.Крачкова применим для произвольного центрального потенциала, что принципиально как для переданных импульсов, когда становится важным конечный радиус ядра, так и для учета экранировки атомными электронами. Для частного случая чисто кулоновского случая воспроизводится результат Ли, Мильштейна и Страховенко 2012 года, что есть важная проверка точности метода диссертанта. Тем самым диссертантом создан новый теоретический аппарат, позволяющий продвинуться дальше предшественников в решении многих задач, часть которых и решена впервые диссертантом и составила содержание последующих глав диссертации.

Первая задача, решенная диссертантом в главе 2 диссертации – это расчет зарядовой асимметрии в тормозном излучении электрона на атоме и также азимутальной асимметрии для продольно поляризованного электрона. Здесь знание первой квазиклассической поправки П.А. Крачкова более чем принципиально, так

как в главном квазиклассическом приближении эти асимметрии отсутствуют. Технические моменты расписаны в деталях в приложении А. На вкус оппонента еще одна страница в этом лаконичном приложении А не помешала бы и придала бы диссертации большую педагогическую ценность, в частности, было бы полезно более подробное описание действий, зашифрованных в трех строках над уравнением (А.142) на стр. 81. Выполнение описанных там действий требует заметных усилий. В этой же главе рассмотрены эффекты конечного размера ядра, особо важные для тормозного излучения релятивистских мюонов.

В главе 3 приведен вывод спектров двойного тормозного излучения во всех порядках по кулоновскому параметру в главном квазиклассическом приближении. Найдено не совсем очевидное соотношение факторизации, согласно которому дифференциальное сечение, с точностью до модификации формфактора, имеет ту же структуру, что и в Борновском приближении. Это красивое наблюдение, оно автором обобщается на случай произвольного числа тормозных фотонов. В конце концов, после неких упражнений, происхождение этой факторизации может быть прослежено к спиральным свойствам квазиклассических волновых функций электронов во внешнем поле в главном квазиклассическом приближении. Эти свойства нарушаются, если ввести первую квазиклассическую поправку. Когда видишь такой красивый результат, то хочется иметь формулировку, которую можно было бы рассказать студентам на лекции курса квантовой электродинамики. Хочется пожелать Петру Александровичу отработать такое педагогическое изложение материала этой главы диссертации.

Материал главы 4 диссертации – фоторождение пар с сопутствующим тормозным излучением на ядрах для циркулярно поляризованных фотонов пучка. Задача решается в главном квазиклассическом приближении. Получены точные по кулоновскому параметру амплитуды процесса, которые затем преобразуются в сумму борновской амплитуды и кулоновской поправки. Дан детальный анализ роли кулоновской поправки, которая существенно меняет дифференциальное сечение, исследована роль атомного формфактора, и вычислены азимутальные асимметрии углового распределения конечных лептонов и фотона для циркулярно поляризованного начального фотона. Показано, что в чисто кулоновском поле

дифференциальное сечение есть скейлинговая функция отношений энергии фотона и лептонов.

Материал главы 5 посвящен классической задаче о кулоновском рассеянии поляризованных электронов с учетом конечного размера ядра. Классической, но не решенной до конца. И здесь П.А. Крачковым получены очень интересные новые результаты, существенно основанные на результатах подхода главы 1 с учетом первой квазиклассической поправки. Во-первых, в случае чисто кулоновского поля можно сравнить предсказания квазиклассического приближения с известными точными результатами. Показано, что квазиклассика с учетом первой поправки блестяще согласуется в дифференциальном сечении с точным решением. Во-вторых, разобраны пределы применимости широко распространенного эйконального приближения и указано, где оно не работает. В-третьих, дан подробный анализ свойств азимутальной асимметрии в рассеянии поляризованных электронов (функции Шермана) как функции кулоновского параметра и угла рассеяния. В-четвертых, обнаружена неожиданная роль малых парциальных волн и показано, что их вклад не ухватывается квазиклассическим приближением с первой поправкой. Наконец, проведен качественный анализ роли конечного размера ядра в точно решаемой модели, где все амплитуды могут быть получены в явном аналитическом виде. Последний пункт наводит на вопрос, насколько трактовка упругого рассеяния в подходе диссертанта может поменять зарядовые распределения в ядрах, извлекаемые в рамках упрощенного Борновского приближения?

Перейду к более формальной оценке диссертационной работы П.А. Крачкова.

#### **Достоверность полученных результатов:**

Достоверность результатов диссертанта убедительно продемонстрирована сравнением с точными решениями идеализированных задач в случаях, когда такие точные решения в литературе известны.

#### **Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов:**

Развитый в диссертации формализм открывает путь к решению большого числа нерешенных ранее задач о КЭД процессах в сильных полях.

Уже полученные диссертантом результаты могут быть использованы для планирования новых экспериментов с ядерными мишенями.

Выше уже были отмечены результаты П.А. Крачкова, которые могут быть использованы при преподавании курса квантовой электродинамики.

#### **Содержание диссертации и её завершенность:**

Все публикации, составившие диссертационную работу П.А. Крачкова, объединены единым формализмом и единой тематикой. Все результаты диссертации опубликованы в ведущих международных физических журналах. Решения всех задач доведены до уровня, когда результаты могут быть использованы как для решения сходных задач, так и для обработки экспериментальных данных или планирования новых экспериментов.

#### **Критические замечания и пожелания:**

Диссертационная работа читалась бы легче, будь изложение не столь лаконичным. Я отмечал выше, что результаты глав 2 и 3 имеют несомненную педагогическую ценность и будь изложение чуть подробнее, эти главы могли бы быть использованы, как готовый учебный материал. Так что хочется пожелать автору сделать из них полезное пособие к курсу квантовой электродинамики. Так же было бы крайне интересно продолжение работы главы 5 диссертации: как более корректный подход диссертанта может поменять определение зарядовых плотностей ядер? Эти замечания и пожелания никак не умаляют научных достоинств диссертационной работы П.А. Крачкова.

#### **Оценка автореферата диссертации:**

Автореферат диссертации адекватно отображает её содержание и полученные в диссертации результаты.

**Заключение оппонента по диссертации П.А. Крачкова на соискание ученой степени кандидата наук:**

Диссертация Крачкова Петра Александровича «Исследование процессов квантовой электродинамики в сильных атомных полях при высоких энергиях» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 (теоретическая физика) является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение на новом уровне теоретической точности задачи о квантовоэлектродинамических процессах в сильных полях при высоких энергиях, имеющей существенное значение как источник нового формализма для теоретического описания процессов во взаимодействии электронов и фотонов высокой энергии с атомными ядрами, так и для интерпретации экспериментальных данных по этим процессам и планирования новых экспериментов. Часть результатов П.А. Крачкова могут быть уже сейчас использованы при преподавании квантовой электродинамики на физических факультетах университетов.

Диссертационная работа П.А.Крачкова «Исследование процессов квантовой электродинамики в сильных атомных полях при высоких энергиях» полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика.

Официальный оппонент,

Николаев Николай Николаевич, доктор физико-математических наук,  
Специальность 01.04.02 – Теоретическая и математическая физика  
nikolaev@itp.ac.ru

Главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН  
Проспект Академика Семенова, д. 1, г. Черноголовка, 142432 Московская обл.,  
тел. : (+7 495) 702-93-17



Н.Н. Николаев

(подпись)

(инициалы, фамилия)

Дата  
печать организации

Подпись Н.Н. Николаева заверю

Ученый секретарь  
ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН  
К.Х.Н.

28.11.2016

