

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертацию П. А. Крачкова
«Исследование процессов квантовой электродинамики в сильных
атомных полях при высоких энергиях»,
представленной на соискание степени кандидата физико-математических наук по
специальности 01.04.02 - теоретическая физика.

Диссертационная работа П. А. Крачкова посвящена теоретическому исследованию квантово-электродинамических (КЭД) процессов во взаимодействиях лептонов с тяжелыми атомами и ионами, включая упругое рассеяние, тормозное излучение и фоторождение электрон-позитронных пар. Все расчеты проводились в квазиклассическом приближении. Автор убедительно показал, что учет первой поправки к квазиклассическим волновым функциям и функциям Грина приводит не только к уточнению теории, но и к появлению ряда новых эффектов, отсутствующих в главном квазиклассическом приближении.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и двух приложений. Список литературы включает 49 наименований и достаточно полно отражает публикации по теоретическим и экспериментальным исследованиям КЭД эффектов в сильных атомных полях. Общий объем диссертации — 91 страница. **Во введении** обосновывается выбор темы работы и формулируются основные подходы к работе. В частности, объясняется необходимость использовать волновые функции и функции Грина в представлении Фарри. Это позволяет аккуратно учесть кулоновское поле атома, которое становится сильным при больших зарядах ядра Z . Далее обосновывается применимость квазиклассического приближения к процессам при больших энергиях, которым и посвящена данная работа. После этого кратко излагается содержание работы. В конце введения формулируются положения выносимые на защиту.

В **первой главе** получена квазиклассическая функция Грина уравнения Дирака для произвольного сферического потенциала с учетом первой поправки по отношению массы налетающей частицы к ее энергии m/ε и по углу рассеяния θ . Явные

выражения получены для квадрированной Функции Грина и из нее получены функция Грина и волновые функции уравнения Дирака. В конце первой главы показано, что для кулоновского поля, полученные волновые функции, переходят в главном квазиклассическом приближении в волновые функции Фарри-Зоммерфельда-Мауэ.

Во **второй главе** исследуется зарядовая асимметрия в тормозном излучении. Известно, что в главном квазиклассическом приближении сечение тормозного излучения не зависит от знака заряда налетающей частицы. Автором диссертации показано, что первая квазиклассическая поправка к дифференциальному сечению тормозного излучения нарушает зарядовую симметрию. Конкретные расчеты асимметричной поправки к сечению проведены для электрона и для мюона. Кроме этого вычислены поправки на отклонение потенциала от кулоновского. Показано, что для мюона важную роль играет поправка на конечный размер ядра.

Третья глава посвящена расчету дифференциального сечения тормозного излучения электрона с излучением двух фотонов. В отличие от предыдущих глав, здесь расчет проводился в ведущем квазиклассическом приближении. Интересный результат этой главы заключается в том, что фактор, зависящий от атомного потенциала одинаков для однофотонного и для n -фотонного сечения. Это дает возможность получить n -фотонное квазиклассическое сечение из расчета в борновском приближении.

В **четвертой главе** рассматривается процесс фоторождения электрон-позитронной пары в атомном поле с излучением дополнительного фотона. Расчеты проведены как в борновском приближении, так и с учетом следующей кулоновской поправки. Оказалось, что эта поправка не меняется при учете экранировки кулоновского поля ядра атомными электронами.

В последней **пятой главе** исследован вопрос о границах применимости квазиклассического приближения. С этой целью рассмотрено дифференциальное сечение упругого рассеяния электрона на атоме. Показано, что вклад второй квазиклассической поправки к этому сечению того же порядка малости, что и вклад малых угловых моментов, которые не описываются квазиклассическим приближением. Тем самым показано, что в рамках квазиклассического приближения имеет смысл учитывать только главный член и первую поправку к нему.

В **заключении** к диссертации сформулированы пять основных результатов автора диссертации. Эти результаты коррелируют с названиями предшествующих глав.

Диссертация П. А. Крачкова хорошо написана. Все результаты убедительно обосно-

ваны и подтверждены аккуратными расчетами с использованием современных методов, многое из которых разработаны группой А. И. Мильштейна, в том числе, и при участии автора диссертации. Несмотря на это, по диссертации можно сделать несколько **замечаний**.

1. Изложение часто носит достаточно формальный характер. Автор сразу переходит к описанию расчетов, лишь очень кратко остановившись на физических свойствах обсуждаемых процессов и на используемых приближениях. В некоторых местах не хватает даже формального определения используемых обозначений и понятий. Так, в параграфе 2.2 проводится расчет кулоновских поправок к тормозному излучению электронов, а определение этих поправок дано только в параграфе 2.3, где обсуждаются аналогичные эффекты для мюонов.

2. Некоторые нетривиальные результаты упомянуты без всяких обсуждений. Например, при расчете сечения тормозного излучения мюона в параграфе 2.3 сказано, что кулоновские поправки к борновскому сечению от двух областей интегрирования точно сокращают друг друга, тогда как для электронов этого не происходит. С чем связано такое полное сокращение разных вкладов остается не понятным.

3. В диссертации отдельно не приведен список работ автора. Вместо этого, они включены в общий список литературы. В тексте не всегда четко отделяются оригинальные результаты, от ранее известных. Это сильно затрудняет чтение.

4. На страницах 25, 39 и 52 повторяется один и тот же аргумент, согласно которому, ненулевой вклад в матричный элемент процесса дают только члены, содержащие четное число гамма матриц. При этом, во всех трех случаях оставляются два члена, один с γ^0 и другой с $\gamma^0\gamma^5$. К тому же, в двух случаях из трех эти рассуждения сопровождаются ссылкой на несуществующую формулу (2.1), вместо формулы (2.27).

Сделанные замечания носят частный характер и не сказываются на общей высокой оценке работы. В целом диссертация П. А. Крачкова представляет собой законченное научное исследование, выполненное на **актуальную тему** и содержащее важные **новые результаты** в исследовании квантово-электродинамических процессов в сильных атомных полях. Все основные результаты работы хорошо **обоснованы и достоверны**.

Нет сомнений, что полученные автором результаты будут полезны при обработке прецизионных экспериментов по поиску новой физики на ускорителях и в исследованиях электромагнитных ливней в детекторах, а разработанные диссертантом подходы будут использованы в дальнейших теоретических исследованиях КЭД эффектов в

сильных полях в ИЯФ им. Г. И. Будкера, в СПбГУ, в ФТИ им. А. Ф. Иоффе, в ПИЯФ им. Б. П. Константинова, в ИТЭФ им. А. И. Алиханова и в Институте спектроскопии РАН.

Материалы диссертации достаточно полно отражены в публикациях в ведущих международных журналах Physical Review A и Physics Letters B и известны специалистам. Они докладывались на многих научных семинарах и на международных конференциях. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Диссертация **удовлетворяет всем критериям**, установленным в «Положении о присуждении ученых степеней» по пунктам 9, 10, 11 и 14 и требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор, П. А. Крачков, несомненно **заслуживает присуждения** ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 - теоретическая физика.

Официальный оппонент,
ведущий научный сотрудник
ФГБУ «ПИЯФ им. Б.П.Константинова»
НИЦ «Курчатовский институт»
доктор физико-математических наук,
Адрес: 188300, Ленинградская обл.,
г.Гатчина, Орлова роща, ФГБУ «ПИЯФ»
Телефон: 8-921-784-02-36
E-mail: mihailgkozlov@gmail.com



Михаил Геннадьевич
Козлов

30 ноября 2016 г.

Подпись М. Г. Козлова заверяю
Ученый секретарь
ФГБУ «ПИЯФ им. Б.П.Константинова»
НИЦ «Курчатовский институт»,
кандидат физ.-мат. наук



С. И. Воробьев

Подпись руки

ЗАВЕРЯЮ

Нач. отдела кадров

