

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Вечернина Владимира Викторовича на диссертацию Попова Романа Владимировича на тему «Спектры позитронов в низкоэнергетических столкновениях тяжёлых ядер как инструмент для наблюдения спонтанного распада вакуума в сверхкритическом кулоновском поле», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности

1.3.3. Теоретическая физика.

Диссертационная работа Попова Р.В. посвящена разработке метода обнаружения спонтанного распада вакуума в сверхкритических кулоновских полях. Расчеты, свидетельствующие о том, что при достижении определенной величины электрического поля в Квантовой Электродинамике (КЭД) должна происходить перестройка основного состояния, приводящая к спонтанному рождению из вакуума электрон-позитронных пар, были выполнены более полувека назад. С тех пор это явление интенсивно изучалось как теоретически, так и экспериментально. Но все попытки наблюдать какие-либо проявления этого явления не увенчались успехом. Основной целью диссертационного исследования является поиск экспериментального сценария, который позволил бы наблюдать признаки перехода в сверхкритический режим в низкоэнергетических столкновениях тяжелых ядер.

Для этого в работе был разработан новый теоретический подход, позволяющий непертурбативно исследовать процесс рождения электрон-позитронных пар в низкоэнергетических столкновениях тяжелых ядер, при сближении которых достигаются критические значения напряженности электрического поля. На основе этого подхода была разработана программа для численного непертурбативного решения нестационарного уравнения Дирака и на ее основе проведены обширные расчеты вероятностей рождения пар и энергетических спектров позитронов для широкого диапазона зарядов сталкивающихся ядер, начальных энергий и прицельных параметров.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Во введении подчеркивается научная значимость темы исследования, в частности, ее принципиальное значение для подтверждения справедливости КЭД для случая сверхсильных электромагнитных полей, а также ее актуальность, связанная с созданием новых экспериментальных установок в России (NICA), Китае (HIAF) и Германии (GSI/FAIR). Кратко изложена история вопроса и сформулированы цели исследования.

В первой главе содержится краткое описание сверхкритического резонанса и его связи с распадом вакуума в КЭД. Рассмотрение проводится в адиабатическом приближении с использованием стационарного уравнения Дирака.

В главе 2 изложен общий формализм для непертурбативного описания процесса рождения пар. Используется формализм квантовой электродинамики в присутствии сильного внешнего поля, которое создаётся двумя сталкивающимися тяжелыми ядрами, которые рассматриваются как классические частицы конечного размера, движущиеся по гиперболическим резерфордским траекториям. В результате задача сводится к решению нестационарного уравнения Дирака в этом внешнем поле. Для его решения строятся наборы in и out состояний, которые являются собственными состояниями гамильтониана Дирака, взятыми в начальный и конечный моменты времени, соответственно.

В главе 3 предлагается специальное разбиение массива траекторий движения ядер на классы с одинаковым значением их минимального сближения R_{\min} . Такие траектории удобно параметризовать не обычной начальной энергией и прицельным параметром, а R_{\min} и параметром η , который представляет собой отношение энергии столкновения к энергии лобового столкновения с тем же R_{\min} . Именно этот прием позволяет в дальнейшем сформулировать признак наличия спонтанного рождения пар из вакуума.

В главе 4 рассмотрен процесс рождения электрон-позитронных пар в низкоэнергетических столкновениях тяжелых ядер в рамках монополюсного приближения, которое учитывает только сферически симметричную часть двухцентрового потенциала ядер. Численно находятся решения нестационарного уравнения Дирака в этом приближении и рассчитывается вероятность рождения пар и энергетические спектры позитронов в столкновениях тяжелых ядер в широком диапазоне параметров столкновений.

В главе 5 численный алгоритм расширяется за рамки монополюсного приближения и исследуется влияние старших членов мультиполюсного разложения двухцентрового потенциала ядер. Расчеты выполняются двумя способами - в системе отсчета, вращающейся вместе с линией соединяющей центры ядер, и в инерциальной системе отсчета, но с потенциалом, утратившим осевую симметрию. Показано, что оба способа приводят к одинаковым результатам, что свидетельствует о надежности полученных результатов. О надежности полученных результатов также свидетельствует их сравнение с результатами работ других авторов, полученных при несколько иных предположениях.

В Заключении суммируются полученные результаты.

В целом работа производит очень хорошее впечатление новизной разработанных подходов, объемом и тщательностью выполненных, как аналитических, так и численных вычислений. Использование, упомянутого выше, параметра η для классификации данных позволяет однозначно сформулировать критерий перехода к сверхкритическому режиму. Его признаком будет являться увеличение вероятности образования электрон-позитронных пар и позитронных спектров для более центральных столкновений, т.е. при стремлении η к 1. Тогда как отсутствие этого роста свидетельствует о доминировании, так называемого динамического механизма рождения пар, не связанного с рождением пар сверхкритическим полем из вакуума, вклад которого наоборот растет с переходом от центральных к периферическим столкновениям.

Показано, что данный яркий результат, полученный в рамках монополюсного приближения, остается справедливым и при учете старших членов мультиполюсного разложения двухцентрового потенциала ядер.

Работа написана ясным языком и хорошо оформлена, однако, после ее прочтения все же остаются некоторые вопросы:

Не совсем понятно, какие частицы должны наблюдаться в конечном состоянии. Если это одно ядро без электронов, плюс еще одно ядро с одним электроном на $1s$ оболочке и еще свободный позитрон, то это трехчастичное состояние. Тогда процедура

нахождения R_{\min} и η по данным рассеяния требует уточнения. Будет ли она однозначна в этом случае?

Возможно ли рассчитать распределение позитронов не только по энергии, но и по углу вылета. Если оно будет разным для сверхкритического и динамического механизма рождения пар, то не может ли это помочь в разделении вклада этих механизмов.

При $R_{\min}=17.5\text{фм}$ (между центрами ядер?) и радиусе ядер порядка 6фм их границы окажутся на расстоянии 5.5фм , не приведет ли это к их взаимной поляризации (перераспределению пространственного распределения нейтронов и протонов в них) при их сближении?

Почему на Рис.21 приведены результаты расчетов только для R_{\min} больше 30фм , тогда как в других расчетах важную роль играет $R_{\min}=17.5\text{фм}$?

Обозначение l для мульти-индекса, введенное на стр.56, не представляется удачным. Во избежание путаницы, лучше было бы использовать, например, греческие буквы.

Данные замечания никоим образом не умаляют достоинств диссертационной работы, которая представляет собой цельное законченное научное исследование, выполненное на высоком научном уровне, содержащее новые результаты, имеющие важное значение для развития физики элементарных частиц. Результаты, представленные в диссертации, опубликованы в трех статьях в высокорейтинговых журналах, Phys. Rev. D и Eur. Phys. J. D, индексируемых в международных и российских базах данных, и докладывались на научных конференциях, включая международные, что доказывает высокий уровень проведенных теоретических исследований.

Диссертация Попова Романа Владимировича на тему: «Спектры позитронов в низкоэнергетических столкновениях тяжёлых ядер как инструмент для наблюдения спонтанного распада вакуума в сверхкритическом кулоновском поле» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Попов Роман Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.3. Теоретическая физика. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Член диссертационного совета

Доктор физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,
профессор, Санкт-Петербургский
государственный университет



Вечернин В.В.

18.02.2025