

## ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Гаврилова Сергея Петровича 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.

Диссертация посвящена поиску экспериментального сценария, который позволил бы наблюдать признаки перехода к режиму сильного постоянного электрического поля, способного нарушить стабильность вакуума, что проявляется в рождении из вакуума электрон-позитронных пар. В современной литературе этот эффект принято называть эффектом Швингера, он является одним из наиболее ярких непертурбативных процессов, позволяющих тестировать наше понимание квантовой теории поля за пределами применимости теории возмущений. В настоящее время такое критическое поле может быть получено только при медленном столкновении двух тяжелых ядер с суммарным зарядом, превышающим критическое значение  $173$ , в области, где их кулоновские поля перекрываются на достаточно длительное время. Эксперименты такой конфигурации могут быть осуществлены в ближайшее время на строящихся экспериментальных комплексах, таких как GSI/FAIR в Германии, HIAF в Китае и NICA в России. Именно этот актуальный сценарий рассматривается в диссертации. Наблюдать эффект Швингера в таких столкновениях непросто, поскольку двухцентровый потенциал ядер зависит от времени, а такое переменное электрическое поле приводит к преобладающему рождению электрон-позитронных пар в пертурбативных процессах (в литературе этот эффект называется динамическим, или индуцированным рождением пар). И экспериментатор сталкивается с проблемой, как выделить эффект Швингера на фоне такого шума. Поиск признаков проявления эффекта Швингера в реалистическом сценарии низкоэнергетических столкновений тяжелых ядер является целью данной работы. Для решения поставленной задачи потребовалось разработать эффективную численную технику, позволяющую непертурбативно исследовать процесс рождения электрон-позитронных пар, была реализована процедура численного решения нестационарного уравнения Дирака с использованием конечного не зависящего от времени базисного набора. В результате анализа было обнаружено, что поведение вероятности рождения пар при фиксированном расстоянии наибольшего сближения  $R_{\min}$  претерпевает качественное изменение, когда заряды сталкивающихся ядер достаточно глубоко проникают в сверхкритическую область. Энергетические спектры позитронов также показывают качественное изменение для сверхкритических столкновений. Достоверность признаков, найденных в рамках монополярного приближения, подтверждается расчетами с полным двухцентровым потенциалом.

На защиту вынесены четыре положения, которые сводятся к следующему: Разработан метод непертурбативных расчетов вероятностей рождения электрон-позитронных пар и энергетических спектров позитронов в низкоэнергетических столкновениях тяжелых ядер за рамками монополярного приближения. Исследовано поведение вероятностей рождения пар и энергетических спектров позитронов при переходе к сверхкритическому режиму для широкого диапазона зарядов ядер, энергий столкновений и прицельных параметров. Обнаружены качественные изменения в позитронных спектрах при переходе к сверхкритическому режиму для столкновений тяжелых ядер с фиксированным расстоянием наибольшего сближения. Показано, что учет старших членов в мультиполярном разложении двухцентрового потенциала ядер сохраняет все признаки перехода к сверхкритическому режиму, обнаруженные в монополярном приближении.

Все эти положения убедительно изложены и в достаточной степени доказаны в тексте диссертации, даны ссылки на соответствующие публикации автора, отмечен собственный вклад автора в представленные результаты. Результаты и положения работы докладывались и обсуждались на ряде представительных международных научных конференций. Они опубликованы в трех журналах (из которых два – первого квартиля), рекомендованных ВАК РФ и входящих в базы данных РИНЦ, Web of Science и Scopus, и хорошо известны специалистам.

Полагаю, что настоящая работа значительным образом дополняет результаты, полученные ранее. Необходимые признаки проявления эффекта Швингера в реалистическом сценарии низкоэнергетических столкновений тяжелых ядер обнаружены. Это хорошая и очень полезная работа. Как и в любой серьезной работе, в этой тоже можно найти мелкие недостатки, на которых я не буду подробно останавливаться. Замечу только, что на взгляд специалиста по квантовой теории поля (КТП) непривычно встретится с некоторыми выражениями из очень ранней КТП, использовавшей наивную аналогию с зонной структурой твердых тел, таких как «Из-за зависимости суммарного потенциала ядер от времени электроны из отрицательно-энергетического континуума могут возбуждаться в связанные состояния или положительно-энергетический континуум.»

Упомянутые недостатки безусловно не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. В целом, диссертация Р.В. Попова выполнена на высоком научном уровне, является законченной научно-исследовательской работой и представляет значительный интерес с теоретической и практической точки зрения. Все основные результаты, представленные в диссертации, являются новыми. Результаты диссертации своевременно опубликованы в ведущих международных журналах.

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, доцент,  
профессор каф. общей и экспериментальной  
Физики РГПУ им. А.И. Герцена



/Гаврилов С.П./

Дата 18.02.2025 г.