

## ОТЗЫВ

официального оппонента Щегельского Валерия Андреевича, доктора физ.-мат. наук, главного научного сотрудника Петербургского института ядерной физики имени Б.П.Константинова, НИЦ Курчатовский институт, на диссертацию Степаненко Юрия Юрьевича «Методы увеличения эффективности регистрации редкого распада  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  в эксперименте E391a», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Успех Стандартной Модели (СМ) в описании процессов столкновений элементарных частиц омрачился (до запуска Большого Адронного Коллайдера (БАК) в Европейском центре ядерных исследований - ЦЕРН) расхождениями при вычислении процессов рассеяния векторных бозонов, ( $Z$  и  $W$ ), являющихся базовыми элементами СМ. Экспериментальное обнаружение векторных бозонов являлось главной задачей программ первых адронных и лептонных коллайдеров. Сам факт обнаружения этих бозонов был триумфом СМ. Для сокращения расхождений П. Хиггсом было предложено ввести еще один бозон – скалярный, именуемый сегодня бозон Хиггса ( $H$ ). Эксперименты на Большом электрон-позитронном коллайдере (ЛЭП-2) в ЦЕРНе смогли только установить нижний предел массы бозона Хиггса, недоступного для ЛЭП. Парадоксально, что обнаруженный в экспериментах на БАК  $H$ -бозон имеет массу  $\sim 125$  ГэВ, что только на  $\sim 20$  ГэВ больше максимальной энергии ЛЭП-2. Наличие такого бозона смещает проблемы расхождений в физике элементарных частиц в область недостижимых энергий. В то же время, остаются вопросы мироздания, например, количество антивещества и вещества во Вселенной, равное в рамках СМ, но сильно отличается (в  $10^{-15}$ ). Конечно, СМ не является всеобъемлющей и поиски отклонений от предсказаний СМ представляются актуальной задачей.

Очевидный путь — это поиск новых объектов-частиц в соответствии с теоретическими представлениями за рамками СМ (расширения СМ). Такие поиски пока неуспешны. В жаргоне экспериментаторов такие поиски называются нуль-экспериментами. Каждый год около 100 статей на эту тему публикуется коллаборациями БАК. Другой путь - измерение параметров разрешенных СМ процессов и установление отклонений от предсказаний.

Классическим примером является измерение CP-нарушения в распадах долгоживущих нейтральных  $K$ -мезонов. Редкий распад  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ , предсказанный СМ, имеет относительную вероятность на уровне  $\sim 10^{-11}$ . Этот распад до сих пор не обнаружен. Диссертация Юрия Юрьевича Степаненко посвящена поиску этого распада, в частности методам увеличения эффективности его регистрации в эксперименте E391a, который был проведен в Японии. Эксперименты такого рода требуют создания ускорителя с высокой

интенсивностью и хорошей временной структурой, позволяющего обеспечить в разумное время достаточное количество каонов. Экспериментальная установка должна обеспечивать высокоэффективную регистрацию распада и возможности для подавления фона. Все это требует значительных финансовых и интеллектуальных ресурсов. В то же время тщательность и применение передовых методик в математическом анализе данных эксперимента позволяет значительно повысить статистическую определенность результата без увеличения времени набора данных. Это определяет не только актуальность, но и научную значимость диссертации Ю.Ю. Степаненко.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы.

Во введении отмечается и обосновывается актуальность диссертационного исследования. Диссертантом приводится краткий обзор литературы, вводящий в суть дела, формулируется цель и основные задачи работы, а также их научная и практическая значимость вместе с новыми результатами, полученными в диссертации.

В первой главе диссертации изложены экспериментальные особенности распадов каонов и предсказания СМ. Полнота и ясность представления характеризует Юрия Юрьевича как грамотного физика.

Во второй главе обсуждается постановка эксперимента E391a, без излишних деталей, ограничившись информацией, необходимых для анализа данных.

В третьей главе в деталях, если не сказать — дотошно, обсуждается отбор событий для восстановления кинематики распада  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ . Очень квалифицированно. Впервые упоминается применение нейронных сетей в нескольких узловых точках анализа.

Новый метод измерения угла попадания  $\gamma$ -квантов в калориметр на основе использования нейронных сетей представлена в четвертой главе. Описывается алгоритм работы нейронной сети, процедура ее обучения и представлены основные характеристики разработанной нейронной сети. Далее диссертант приступает к основной задаче — процедуре восстановления массы частицы, соответствующей двум зарегистрированным  $\gamma$ -квантам, что было сделано в эксперименте E391a впервые.

Обычно для идентификации частицы, распавшейся на два  $\gamma$ -кванта, достаточно измерить их энергии и точки входа в электромагнитный калориметр. Вершина события определяется траекториями частиц в событии. Знание координат вершины и точки входа в калориметр позволяет вычислить углы вылета  $\gamma$ -квантов и массу частицы. Особенность проводимого эксперимента по поиску распада  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  состоит в том, что вершина распада была неизвестна. Предполагая, что эта частица является продуктом распада  $K_L^0$ , известна траектория каона, определенная коллиматорами. Поэтому в стандартном анализе данных эксперимента E391a вершина распада  $K_L^0$  вычислялась в предположении, что  $\gamma$ -

кванты являются продуктами распада  $\pi^0$ . Точка входа определяется из распределения электромагнитного ливня в кристаллах калориметра.

Для нахождения угла входа  $\gamma$ -кванта в калориметр нужна информация о пространственном развитии ливня по длине каждого кристалла. Моделирование этого процесса достаточно точно проделано в известной программе Geant4. Вполне оправдано применение нейронных сетей для определения угла попадания  $\gamma$ -кванта в калориметр, основываясь на моделировании отклика детектора. Вычисленные значения углов таким образом позволили определить массу распавшейся частицы событий  $X \rightarrow \gamma\gamma$ . Эти величины были использованы при подавлении фоновых событий.

В пятой главе рассматривается новый оригинальный подход к дополнительному росту эффективности регистрации распада  $K_L^0 \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$  путем автоматической оптимизацией критериев отбора событий с применением метода генетического программирования. Описана реализация метода автоматической оптимизации и создание программы оптимизации. В результате использования метода удалось повысить эффективность отбора событий для второго сеанса набора данных эксперимента на 10%. Такой результат ожидаем, если выбранные критерии не коррелированы.

В шестой главе представлена новая разработанная автором схема анализа данных полной статистики эксперимента E391a, на основе разработанных методик. В результате использования комбинации методов в анализе данных, чувствительность эксперимента E391a к событиям редкого распада  $K_L^0 \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$  увеличилась на 65 %.

Заключение содержит перечень основных результатов работы.

Практическую значимость разработанных методик и новизну полученных результатов легко понять, если представить, что достигнута такая экономия затраченного времени работы ускорителя, человеческих и финансовых ресурсов. Результаты работы Ю.Ю. Степаненко и применение нейронных сетей и метода генетического программирования могут инициировать использование такого подхода в экспериментах по поиску долгоживущих нейтральных частиц (суперсимметричных, например) в экспериментах на БАК.

Результаты, полученные автором диссертации, могут быть использованы при проведении, планировании и анализе экспериментов как в ОИЯИ, Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» и других институтах РФ, а также за рубежом.

По диссертационной работе можно сделать следующие замечания:

1) Во второй главе не обошлось без жаргона (физический триггер) и незначительных пропусков: «Главный баррель ... предназначался для регистрации... распадов». Конечно,

далее поясняется несколько раз, что речь идет об антисовпадениях по основному каналу, регистрируемому CsI-калориметром.

2) Хотелось бы увидеть описание процедуры расчета верхнего предела, тем более что в эксперименте КОТО его определение отличается от E391a.

3) Рис 4.5 показывает, что при большой статистике описание отклонения от среднего значения функцией Гаусса не является удовлетворительным. Я бы посоветовал рассмотреть вместо распределения Гаусса функцию Леви.

Однако указанные замечания не снижают высокого качества проведенных исследований. Диссертационная работа Степаненко Ю. Ю. является законченным исследованием и выполнена на высоком научном уровне, что свидетельствует о высокой квалификации автора.

Достоверность результатов диссертации и личный вклад автора не вызывает сомнений. Основные результаты опубликованы в девяти работах, пять из которых изданы в реферируемых журналах, рекомендованных ВАК и входят в базу данных Scopus и РИНЦ. Результаты исследований были доложены на международных конференциях.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Таким образом, диссертационная работа «Методы увеличения эффективности регистрации редкого распада  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  в эксперименте E391a» отвечает всем требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Юрий Юрьевич Степаненко заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Официальный оппонент  
доктор физ.-мат. наук

В. А. Щегельский

Щегельский Валерий Андреевич  
доктор физ.-мат. наук, главный научный сотрудник Петербургского института ядерной физики имени Б. П. Константинова, НИЦ Курчатовский институт  
Россия, 188300, Ленинградская обл.,  
г. Гатчина, мкр. Орлова роща, д. 1, НИЦ «Курчатовский Институт» - ПИЯФ  
Тел.: +7 (813) 714-60-32 секретарь  
Эл. почта: Valery.Schegelsky@cern.ch

Подпись Щегельского В. А. заверяю.

Ученый секретарь ПИЯФ  
кандидат физико-математических наук



Воробьев С.И.

11 июня 2019 г.