

## ОТЗЫВ

официального оппонента Смирновой Лидии Николаевны, доктора физ.-мат. наук, профессора физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова 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

В настоящее время в физике частиц наблюдается существенный прогресс в измерениях редких процессов, несущих информацию о степени применимости Стандартной модели к описанию фундаментальных взаимодействий частиц в целом и величине нарушения в них зарядово-пространственной (CP) симметрии. Иллюстрацией такого прогресса являются измерения относительной вероятности редких распадов В-мезонов на два мюона в экспериментах Большого адронного коллайдера ATLAS, CMS и LHCb, величины которых находятся на уровне  $10^{-9}$  и  $10^{-10}$ , и измерение величины нарушения CP-нарушения в системе D-мезонов в эксперименте LHCb порядка  $10^{-4}$  (март 2019 г.). Классической задачей эксперимента, сохраняющей актуальность в течение десятилетий, является измерение CP-нарушения для K-мезонов. Редкий распад  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  несет прямую информацию о величине нарушения CP-симметрии в Стандартной модели. Этот распад до сих пор не обнаружен. Оценки верхней границы его относительной вероятности более, чем на три порядка, ниже, чем рассчитанная его вероятность в Стандартной модели, находящаяся на уровне  $10^{-11}$ . Диссертация Юрия Юрьевича Степаненко посвящена поиску этого распада в эксперименте E391a, проведенном в Японии, и решает задачу увеличения эффективности регистрации распада  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  методами математического анализа данных эксперимента. Это определяет **актуальность темы** диссертации Ю.Ю. Степаненко.

В современных экспериментах физики частиц разработка математических процедур и методов анализа данных, получаемых непосредственно с детекторов установки, приобретает все большее значение. Их усовершенствование позволяет как расширить области выполнения измерений, так и повысить точность результатов измерений. В работе Ю.Ю. Степаненко повышение точности измерений эксперимента осуществляется путем увеличения эффективности регистрации исследуемого распада, который до настоящего времени не обнаружен. Увеличение эффективности обеспечивает возможность понижения верхней экспериментальной границы на величину относительной



вероятности распада и определяет **научную значимость результатов**, полученных в диссертации.

Решение задачи увеличения эффективности регистрации распада  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  выполнено путем создания Ю.Ю. Степаненко **нового алгоритма** автоматической оптимизации критериев отбора событий с применением метода генетического программирования. Важный вклад в успешный результат применения этого метода для определения эффективности регистрации распада привнесли другие достижения, представленные в работе. К ним относятся модернизация и усовершенствование метода определения угла попадания в детектор гамма-квантов от распада  $\pi^0$ -мезона, разработка метода реконструкции вершины распада, в которой были образованы гамма-кванты, и определение массы распавшейся частицы на основе информации об углах попадания гамма-квантов в детектор. Совокупность этих разработок определяет **новизну результатов**, полученных в диссертации Ю.Ю. Степаненко.

Несомненным **достижением** диссертации является определение количественной величины увеличения чувствительности экспериментальной установки к выделению распада  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ , полученная путем проведения повторного анализа данных эксперимента E391a с применением разработанных диссертантом методов анализа. Это весьма затратная по вычислительным ресурсам процедура, и выделение таких ресурсов демонстрирует востребованность выполненных в работе программных разработок. Расчеты показали, что в результате применения методов и программ, описанных в диссертации, чувствительность эксперимента E391a увеличилась на 65%. К сожалению, условия коллаборации E391a не позволили опубликовать новое значение ограничения на величину верхней границы относительной вероятности распада  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ , но ясно, что оно является значимым.

**Достоверность** результатов диссертации определяется новейшими методами генетического программирования, известными к настоящему времени, а также использованием стандартного программного пакета анализа данных ROOT и пакета GEANT4. Подтверждением достоверности также является совпадение результатов анализа фоновых процессов в старой и новой версии обработки данных (таблица 6.3 диссертации). Усовершенствования проявились в результатах обработки искомого редкого распада.

**Практическая значимость** результатов работы Ю.Ю. Степаненко в первую очередь заключается в перспективе их применения в новом эксперименте KOTO, запущенным в Японии для продолжения поиска распада  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  той же методикой, но с более высокой сегментацией калориметра для регистрации гамма-квантов.



Среди **результатов** диссертации следует выделить создание метода восстановления угла попадания гамма-квантов в калориметр, представленная в главе 4 диссертации. В этом методе была использована специально обученная нейронная сеть GRNN с радиально базисными передаточными функциями. Учёт поправочных коэффициентов к непосредственно измеренным значениям углов независимо обеспечил увеличение чувствительности установки к регистрации распада  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  на 35%.

Особое внимание заслуживает разработка метода автоматической оптимизации критериев отбора событий. В любом эксперименте при исследовании редких процессов такая оптимизация критична для достижения наилучших результатов. В работе разработан оригинальный метод автоматической оптимизации с использованием генетического программирования, отличного от метода генетических алгоритмов. Описание метода приведено в главе 5 диссертации. По итогам автоматической оптимизации критериев отбора событий в эксперименте E391a чувствительность установки в рассматриваемой задаче была увеличена на 10%.

Повторная обработка данных эксперимента E391a была выполнена с применением обоих разработанных методов. Приведенные в главе 6 на рис. 6.3 результаты этой обработки показывают систематическое увеличение чувствительности эксперимента по мере увеличения количества итераций в расчетах, однако наиболее оптимальные критерии отбора событий выглядят как нерегулярные выбросы. Это дополнительно демонстрирует актуальность выбора правильных критериев отбора событий при проведении анализа данных в различных экспериментах и результативность разработанного метода их оптимизации, что является несомненным достоинством диссертации.

Диссертация содержит достаточно полный обзор измерений явления CP-нарушения в разных типах распадов, написана литературным языком, практически не содержит опечаток.

В качестве замечаний можно отметить следующее.

1. Используемый в диссертации символ с волной для антинейтрино в литературе обозначает суперпартнера нейтрино. Правильный символ содержит черту  $\bar{\nu}$ .
2. В тексте диссертации цитирование должно начинаться с 1, а не с ссылки 10, как это сделано.
3. В обзоре указана ссылка 13 по поиску распада  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  как экспериментально подтверждающая нарушение CP четности. Распад не обнаружен, значит нет и подтверждения.
4. Опечатка на странице 41, пропущена запятая на стр. 82.

5. Неполное описание переменных, используемых на рисунках в разделе 3.1.3. Например, на рис. 3.5 какая из переменных  $X_{COE}$  и  $X_{inc}$  относится к истинной и восстановленной координате, не указано.
6. В тексте отсутствует какое-либо обсуждение или пояснение результата, приведенного на рис. 4.10, не указана причина существенно несимметричного вида.

Указанные замечания не снижают высокого качества проведенных исследований. Результаты опубликованы. Личный вклад автора не вызывает сомнений. Автореферат отражает содержание диссертации.

Результаты, полученные автором диссертации, могут быть использованы при проведении, планировании и анализе экспериментов как в нашей стране в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт», ОИЯИ, ФИАН, НИИЯФ МГУ, ИЯИ РАН, так и за рубежом.

Таким образом, диссертация Юрия Юрьевича Степаненко на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является завершенной научно-квалификационной работой, в которой изложены достоверные и научно-обоснованные результаты, использование которых вносит значительный вклад в развитие научного потенциала страны, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Официальный оппонент  
профессор, доктор физ.-мат. наук

Л.Н. Смирнова

Смирнова Лидия Николаевна  
доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры общей ядерной физики физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2, Физический факультет  
Тел.: +7 (495) 939-16-82  
Эл. почта: lns@physics.msu.ru; Lidia.Smirnova@cern.ch

Подпись Смирновой Л.Н. заверяю.

Декан физического факультета МГУ  
профессор



Н.Н. Сысоев

27 мая 2019 г.