

Реферат

Исследование слабых процессов с помощью детектора ЕХО-200

В.А. Белов (лаб. 201), А.Г. Долголенко (лаб. 112), О.Я.Зельдович (лаб 201), А.К. Карелин (лаб. 201), А.В. Кученков (лаб. 201), В.Н.Стеханов (лаб. 205)

В настоящее время в физике частиц активно развивается экспериментальная область, связанная с поисками «новой физики» за пределами Стандартной Модели. Очень перспективным направлением в этой области является изучение свойств нейтрино и слабого взаимодействия. Поиск безнейтринного канала двойного бета-распада — наиболее эффективный способ установить абсолютную шкалу и иерархию масс нейтрино, также это наиболее чувствительный тест в поисках «новой физики».

Установка ЕХО-200 была создана для поиска безнейтринного двойного бета-распада ^{136}Xe при активном участии сотрудников ИТЭФ. Эксперимент ЕХО-200 первым перешел к использованию образцов обогащенных изотопов в сотни килограмм, что вывело исследования на новый уровень. Высокие характеристики детектора позволили получить выдающиеся результаты: обнаружить давно ожидаемый двухнейтринный канал двойного бета-распада ^{136}Xe и измерить его период полураспада с наилучшей точностью среди всех известных 2β -распадинов; поставить жесткие пределы на безнейтринный канал распада и распад с испусканием майорона; а также провести ряд прикладных исследований, связанных с взаимодействием частиц с жидким ксеноном. Эксперимент ЕХО-200 закончил набирать данные в конце декабря 2018 года. В настоящее время проведена обработка всех данных двух фаз эксперимента.

Основным источником фона являются гамма-кванты радиоактивности материалов. Свойства детектора позволяют разделять гамма- и бета-события по количеству вершин взаимодействия. Для достижения наилучших результатов в эксперименте был разработан специальный дискриминатор для отделения 2β -событий от фона с использованием метода глубокого обучения на основе нейронных сетей (DNN). Была выбрана архитектура сверточной нейронной сети, использующая на входе информацию о форме сигналов с проволочек, собирающих ионизационный заряд в детекторе, а на выходе обеспечивающая ответ, насколько событие похоже на искомый сигнал. Предварительно было показано, восстановление энергии с помощью DNN дает лучшие результаты, чем стандартные классические алгоритмы, реализованные в эксперименте. Использование нового дискриминатора позволило увеличить чувствительность эксперимента на 25% по сравнению с предыдущими результатами (2018 год). В анализе были сделаны дополнительные улучшения. Эффективность поиска $0\nu\beta\beta$ сигнала увеличена с 80% до 96-98%. Энергетическое разрешение детектора при энергии $0\nu\beta\beta$ -перехода ^{136}Xe ($Q = 2475$ кэВ) улучшено до $1,15 \pm 0,02\%$. Комбинируя данные нового анализа обоих фаз эксперимента, определена чувствительность для периода полураспада по $0\nu\beta\beta$ -каналу $T_{1/2} > 5,0 \cdot 10^{25}$ лет (CL 90%) на экспозиции 234,1 кг-лет.

Статистически значимый сигнал $0\nu\beta\beta$ -распада не наблюдался. Получен предел на периода полураспада по каналу $0\nu\beta\beta$ $T_{1/2} > 3,5 \cdot 10^{25}$ лет (CL 90%), установлено ограничение на эффективную массу майорановского нейтрино ($m_{\beta\beta} < 93\text{--}286$ мэВ). Результат опубликован в PRL и докладывался на конференции TAUP-2019. Полученные результаты находятся на уровне самых чувствительных экспериментов в мире.

Установка EXO-200 является высокоэффективным детектором с очень низким собственным уровнем фона, позволяющим проводить и другие исследования (в частности были получены хорошие результаты по поиску распада ^{134}Xe , проверке стабильности нуклонов в ядре и исследованию космогенных источников фона). Важнейшей задачей как для исследования 2β -распада, так и для разрешения «реакторной аномалии» является проверка и уточнение ядерных моделей, влияющих на расчеты ядерных матричных элементов и на форму наблюдаемых энергетических спектров. Известная проблема «реакторной аномалии» заключается в расхождении предсказываемого и наблюдаемого энергетических спектров реакторных антинейтрино. Большую роль в комбинированном спектре бета-распадов изотопов в реакторе играют запрещенные переходы. Хорошим объектом для изучения представляется изотоп ^{137}Xe . Он располагается в гуще продуктов деления ядер урана и его распад является запрещенным. Результаты проведенных на установке EXO-200 измерений показывают, что формы бета-спектра распадов ^{137}Xe на основное состояние ^{137}Cs совпадают с теоретическими предсказаниями. В ходе обработки калибровочных данных также удалось выделить достаточно чистый набор событий с распадами изотопа ^{137}Xe на основной уровень. Полученная форма спектра полностью совпадает с теоретической моделью, отклонения не имеют зависимости от энергии.

Группа ИТЭФ внесла существенный вклад в создание детектора, обеспечение установки обогащенным ксеноном, проведение набора данных, разработку программ моделирования и обработки данных, а также собственно анализ получаемых данных.

Публикации, вынесенные на конкурс

1. S. Delaquis, et al., (EXO-200 coll.), "Deep Neural Networks for Energy and Position Reconstruction in EXO-200", **JINST** **13**, P08023, (2018)
2. G. Anton, et al, (EXO-200 coll.), "Search for Neutrinoless Double-Beta Decay with the Complete EXO-200 Dataset", **Phys.Rev.Lett.** **123**, 161802, (2019)
3. S. Al Kharusi, G. Anton, et al (EXO-200 coll.), "Measurement of the Spectral Shape of the beta-decay of Xe^{137} to the Ground State of Cs^{137} in EXO-200 and Comparison with Theory", **Phys.Rev.Lett.** **124**, 232502, (2020)

Творческий вклад каждого из авторов.

О.Я.Зельдович — руководитель проекта от ИТЭФ, участие в рабочих компьютерных совещаниях, смены на удаленном контрольном центре, первоначальный отбор данных (качество), обсуждение статей.

В.А. Белов — ответственный за удаленный контрольный центр, дежурства на установке, моделирование и обработка данных распада ^{137}Xe , участие в EXO-week конференциях, доклады на конференциях в России.

А.Г. Долголенко — организация разделения изотопов в России для получения ^{136}Xe из ксенона ИТЭФ с естественным содержанием изотопов, обсуждение результатов.

А.К. Карелин — участие в разработке и проверке электроники в SLAC в первые годы, смены на удаленном контрольном центре.

А.В. Кученков — участие в проверке электроники в SLAC, смены в шахте WIPP и на удаленном контрольном центре.

В.Н. Стеханов — дизайн и монтаж детектора примесей в SLAC, смены на удаленном контрольном центре, исследования SiPM'ов.

Руководитель работ к.ф.м.н. , нач.лаб. 201

/Зельдович О.Я./