

Разработка нейтринного детектора, использующего эффект когерентного рассеяния, для мониторинга ядерных реакторов

(Аннотация проекта под рук. Ефременко Юрия Валентиновича)

В настоящее время во всем мире ведутся интенсивные работы по созданию следующего поколения компактных и относительно недорогих нейтринных детекторов, способных обеспечить как национальные нужды, так и нужды МАГАТЭ в области мониторинга ядерных реакторов [1, 2]. Во всех действующих в настоящее время приборах для регистрации нейтрино используется эффект обратного бета-распада легких ядер. Однако существует и другой подход, который позволяет создавать более эффективные, компактные и мобильные приборы. Этот подход основан на использовании эффекта когерентного рассеяния нейтрино на тяжелых ядрах. Когерентное рассеяние нейтрино на ядрах – фундаментальный физический процесс, обязанный происходить согласно Стандартной модели электрослабых взаимодействий [3], до сих пор не наблюдавшийся на практике. Когерентное рассеяние нейтрино на ядрах играет важную роль в процессе формирования Вселенной и эволюции звезд. Предполагается [4], что когерентное рассеяние будет весьма чувствительным к нестандартным нейтринным взаимодействиям и послужит пробником новой физики.

При когерентном рассеянии энергия от нейтрино передается всему ядру и составляет ~ 1 кэВ для реакторных антинейтрино с энергией ~ 1 МэВ. Сечение когерентного рассеяния для нейтрино с энергиями до 50 МэВ пропорционально N^2 , где N – число нейтронов в ядре, на котором происходит рассеяние. Благодаря этому мощному усиливающему фактору, когерентное рассеяние доминирует среди всех возможных процессов взаимодействия нейтрино с тяжелыми ядрами в области низких энергий, однако, регистрация этих взаимодействий значительно затруднена из-за очень незначительного энерговыведения. Дополнительными факторами, осложняющими регистрацию, служат эффективная рекомбинация продуктов ионизации в треках тяжелых ядер отдачи, понижающая ионизационный выход до нескольких электронов на 1 кэВ поглощенной энергии, а также тот факт, что кинетическая энергия, приобретаемая ядрами отдачи при рассеянии нейтрино, обратно пропорциональна массе ядра-мишени [5, 6].

Наиболее эффективно отдельные электроны можно регистрировать в массивных мишенях из жидкого ксенона или аргона путем вытягивания их электрическим полем из жидкости и регистрации сигнала, усиленного в газе. Этот так называемый *эмиссионный метод регистрации* был предложен 40 лет назад на кафедре экспериментальной ядерной физики МИФИ [7]. Адаптация этого подхода для низкофоновых экспериментов была предложена 15 лет назад [8]. Ныне эмиссионные детекторы такого типа используются в наиболее удачных экспериментах по поиску холодного темного вещества во Вселенной, включая идущие в настоящий момент эксперименты XENON и ZEPLIN и эксперименты следующего поколения, находящиеся в процессе подготовки - LUX, WARP и LZ [9].

Целью предлагаемого проекта является разработка и создание полномасштабного нейтринного детектора нового поколения, использующего эффект когерентного рассеяния на тяжелых ядрах для повышения чувствительности к реакторным антинейтрино. Задачами НИР являются:

1) исследование отклика жидкоксенонового эмиссионного детектора на энерговыделения порядка 1 кэВ с помощью существующей модели эмиссионного детектора с массой рабочего вещества 5 кг на ИРТ МИФИ,

2) разработка и создание и испытание полномасштабного нейтринного детектора с массой рабочего вещества 100 кг для регистрации когерентного рассеяния антинейтрино на тяжелых атомных ядрах.

В настоящее время сложилась коллаборация сотрудников ряда кафедр и реактора (ИРТ) НИЯУ МИФИ, а также НИЦ «Курчатовский институт», которая располагает работающей моделью жидкоксенонового эмиссионного детектора. В 2011 году планируется экспонировать эту модель на нейтронном пучке учебно-исследовательского реактора ИРТ МИФИ для исследования отклика на энерговыделения в субкэВной области, а также для мониторинга фонов при постановки реакторного эксперимента по когерентному рассеянию реакторных антинейтрино. В рамках предлагаемого проекта на основании полученных на первом этапе результатов будет создан экспериментальный образец детектора с массой рабочего вещества 100 кг и проведена подготовка детектора к эксперименту. Помимо огромного фундаментального значения открытие процесса когерентного рассеяния будет иметь важный практический выход – обеспечит возможность нейтринной диагностики активной зоны реактора с целью

- контроля выходной мощности промышленного реактора [9, 11],
- определения содержания плутония в активной зоне [12],
- мониторинга выгорания реакторного топлива [13],
- диагностики критических ситуаций [14],
- подвижный детектор или несколько одновременно работающих такого рода детекторов, размещенных вокруг действующего реактора, могут обеспечить изотопную томографию его активной зоны [10].

Предлагаемый относительно массивный эмиссионный детектор может быть также использован для очень эффективного поиска безнейтринного позитронного двойного бета-распада, обладающего уникальной сигнатурой [15]. Благодаря сложной топологии полезных событий, такой детектор, несмотря на чрезвычайную редкость искомого распада, не нуждается в размещении в подземной лаборатории и может работать только с пассивной и активной защитой, например, в учебно-исследовательской лаборатории университета. Большой жидкоксеноновый эмиссионный детектор также может использоваться для поиска темного холодного вещества в форме WIMP. Совокупность фундаментальных задач делает этот инструмент многоцелевым, а потому весьма привлекательным для многолетней программы перспективных научных исследований.

Ещё одно чрезвычайно важное применение разрабатываемой технологии жидкоксеноновых детекторов - прецизионная позитронно-эмиссионная томография для исследования молекулярных биологических процессов *in vivo*, в частности, для томографии головного мозга человека в ядерной медицине. Современные ПЭТ системы, основанные на кристаллических сцинтилляторах, имеют жесткие ограничения на качество изображения из-за параллакс-эффекта, т.е. неопределенности порядка размера сцинтилляционных кристаллов, используемых для определения положения точки эмиссии аннигиляционных гамма-квантов. Жидкоксеноновый эмиссионный детектор позволит определять трехмерное положение всех точек взаимодействий аннигиляционных (511 кэВ) гамма-квантов в материале детектора с точностью лучше 1 куб.мм вокселя, идентифицировать все точки взаимодействия гамма-квантов в рабочем веществе

детектора, различить Комптоновское рассеяние и фотопоглощение, и в результате значительно уменьшить параллакс-эффект при реконструкции изображения. Жидкий ксенон – исключительно удачная альтернатива дорогим и ограниченно-доступным кристаллическим сцинтилляторам и полупроводниковым детекторам, используемым в настоящее время в качестве детекторов в современных ПЭТ системах. Ксенон доступен в количествах достаточных для массового производства относительно дешевых ПЭТ систем для прецизионного изображения мозга человека и маленьких животных (последнее необходимо для фармакологических исследований), а также недоступных для современной техники ПЭТ систем «на все тело».

В результате выполнения этого проекта в НИЯУ МИФИ будет создана лаборатория новых детекторных технологий, имеющих важное практическое значение (диагностика энергетических реакторов, ядерная медицина, мониторинг ядерных материалов), и сделает НИЯУ МИФИ держателем «ноу-хау» технологий мирового класса.

Ссылки

1. D. Lhuillier, Reactor neutrino monitoring, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* 188 (2009) 112-114.
2. M. Criber, Reactor monitoring with Neutrinos, in 2p3-00139977, version 1 – 4 Apr 2007; *XXII Int. Conf. on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2006)*, Santa Fe, New Mexico, 2006.
3. Yu.V.Gaponov and V.N. Tikhonov, Elastic scattering of low-energy neutrinos by atomic systems, *Ядерная Физика* 26(1977)594
4. J.Barranco et al. Probing new physics with coherent neutrino scattering off nuclei, *arXiv:hep-ph/0508299v2* 29 Nov 2005.
5. C. Hagmann, A. Bernstein, Two-phase detector for measuring coherent neutrino-nucleus scattering, *IEEE TNS* 51 (2004) 2151-2154.
6. D. Akimov, A. Bondar, A. Burenkov, A. Buzulutskov. Detection of reactor antineutrino coherent scattering off nuclei with a two-phase noble gas detector, *2009 JINST 4 P06010*
7. Б.А. Долгошеин, В.Н. Лебедеенко, Б.У. Родионов, Новый метод регистрации треков ионизирующих частиц в конденсированном веществе, *Письма в ЖЭТФ* 11 (1970).
8. A. Bolozdynya, V. Egorov, B. Rodionov, V. Miroshnichenko, Emission detectors, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 42 (1995) 565-569; A. Bolozdynya, Two-phase emission detectors and their applications, *Nucl. Instrum. Meth. A*, 422 (1999) 314-320.
9. E. Aprile and L. Baudis, Status and sensitivity projections for the XENON100 dark matter experiment, *arXiv:0902*, 2008.
10. В.Б. Бруданин, Нейтринные эксперименты на Калининской АЭС, Доклад на конференции «Современные проблемы физики нейтрино и астрофизики», НИИЦ КИ, 14 октября 2009.
11. В.А. Коровкин и др., Измерение выгорания ядерного топлива в реакторе по эмиссии нейтрино, *Атомная Энергия*, т.56, вып.4 (1983) 214-218.
12. Л.А. Микаэлян, *Proc. Int. Conf. Neutrino-77*, v.2, p.383; А.А. Боровой, Ю.Л. Добрынин, В.И. Копейкин, Энергетические спектры электронов и антинейтрино от осколков деления ^{235}U , ^{239}Pu тепловыми нейтронами, *ЯФ* 25 (1977)264-269.
13. В.А. Коровкин и др., Измерение выходной мощности атомной электростанции с помощью регистрации нейтрино, *Атомная Энергия*, т.65, вып.3 (1988) 169-173.
14. А.А. Боровой и др., Возможности нейтринной диагностики критических ситуаций на атомных электростанциях, *Атомная Энергия*, т.70, вып.6 (1991) 386-388.
15. A. Bolozdynya, V. Egorov, A. Koutchenokov, G. Safronov, G. Smirnov, S. Medved and V. Morgunov . An electroluminescence emission detector to search for double beta positron decays of ^{134}Xe and ^{78}Kr , *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 44 (1997) 1046-1051.