

УДК 539.1.07; 539.123

BOREXINO — НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ СОЛНЕЧНОЙ НЕЙТРИННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

О. А. Займидорога

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна
Лаборатория физики частиц

Описано состояние работ по подготовке низкофонового нейтринного детектора Borexino для исследования солнечных нейтрино в подземной лаборатории Гран-Сассо (Италия).

The status of the low-noise neutrino detector BOREXINO for solar-neutrino studies at the underground laboratory in Gran Sasso (Italy) is presented.

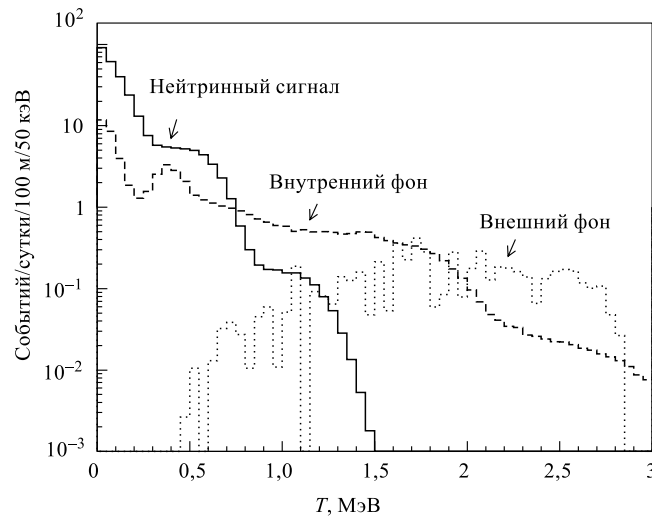
Исследование солнечных нейтрино в настоящее время является наиболее важной задачей современной физики и астрофизики. Данные о потоке солнечных нейтрино получены в четырех экспериментах: Homestake, Kamiokande, Gallex и Sage. Измеренные потоки солнечных нейтрино во всех экспериментах оказались меньше предсказанного уровня в соответствии со стандартной моделью Солнца (СМС). Более того, сравнение результатов разных экспериментов дополнительно приводит к проблеме спектра нейтрино от распадов ^8B и так называемой проблеме «бериллиевых» нейтрино: сравнение результатов Kamiokande и галлиевых экспериментов исключает вклад «бериллиевых» нейтрино от реакции электронного захвата на ^7Be , хотя в эксперименте Kamiokande наблюдается нейтрино от распада дочернего ядра ^8B . Теоретические исследования проблемы выходят за рамки стандартной теории электро-слабых взаимодействий и требуют создания новых детекторов, позволяющих исследовать спектр солнечных нейтрино в области низких энергий.

Borexino — первый детектор реального времени, способный регистрировать солнечные нейтрино низких энергий с порогом 250 кэВ по электронам отдачи. Наблюдение моноэнергетических нейтрино с энергией 0,86 МэВ («бериллиевых» нейтрино) является главной задачей эксперимента. Так как нейтрино-электронное рассеяние содержит вклад как заряженного, так и нейтральных токов, то нейтринный сигнал, регистрируемый детектором Borexino, определяет ароматическую композицию падающих нейтрино. Это, в свою очередь, позволяет исследовать ароматическую структуру «бериллиевых» нейтрино.

Детектор Borexino представляет собой сцинтилляционный детектор, содержащий 300 т жидкого органического сцинтиллятора, заключенного в сфе-

рический прозрачный контейнер диаметром 8,5 м и просматриваемого со всех сторон 2200 ФЭУ с большим диаметром фотокаатода. Прозрачный контейнер из нейлона толщиной 500 мкм, ограничивающий активный объем детектора, размещен в стальной сфере диаметром 13,5 м, на которой крепятся ФЭУ с оптическими концентраторами, перекрывающими 30% полного телесного угла. Буферная область между внутренним объемом и стальной сферой заполняется органической жидкостью, имеющей ту же плотность, что и сцинтиллятор (псевдокумол, C_9H_{12}), при этом компенсируется выталкивающая сила, действующая на нейлоновый контейнер. Вся конструкция помещена в бак из нержавеющей стали размером 18×18 м, заполненный ультрачистой деионизованной водой, которая служит защитой от внутреннего и внешнего фона (нейтронов, γ -излучения от скальных пород и т. п.).

Основной проблемой эксперимента является уменьшение фона в сигнальном окне. Порог детектора 0,25 МэВ по электронам отдачи определяется присутствием радиоактивного изотопа ^{14}C в органическом сцинтилляторе, поэтому будут наблюдаться солнечные нейтрино с энергиями выше 0,45 МэВ, что исключает возможность наблюдения pp -нейтрино. Ожидаемый в стандартной модели Солнца эффект составляет около 50 событий в сутки для 100-тонного выделенного объема сцинтиллятора. Спектр нейтринных сигналов и сопутствующий фон приведены на рисунке. Внутренний фон является наиболее критическим с точки зрения возможности создания детектора с требуемыми характеристиками. Радиоактивность сцинтиллятора является



Эффект, ожидаемый в СМС (без осцилляций нейтрино), в сравнении с фоном

Необходимая чистота сцинтиллятора

^{238}U , ^{232}Th	$< 10^{-16}$ г/г
^{40}K	$< 10^{-14}$ г/г
$^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$	$< 10^{-18}$ г/г
^7Be , ^{10}Be	$<$ нескольких событий/сут

следствием естественной (^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K) и космогенной (^{14}C , ^7Be , ^{10}Be) радиоактивности. Осуществление проекта Bogexino требует высокой радионуклидной чистоты в масштабах сотен тонн сцинтиллятора и тысяч тонн воды защиты. Необходимые уровни очистки по различным радиоактивным изотопам приведены в таблице.

Для изучения возможности достижения необходимых технических требований был сооружен реалистичный детектор со всеми характеристиками Bogexino. Прототип установки Bogexino (Counting Test Facility — CTF) был сооружен в Национальной лаборатории Гран-Сассо в Италии (в подземном тоннеле длиной 100 м под горным массивом Апеннины в центральной Италии) и защищен от космических лучей. Основной целью создания CTF являлось измерение содержания радиоактивных примесей в жидком сцинтилляторе, в частности ^{14}C , ^{238}U и ^{232}Th . Предел чувствительности установки к содержанию ^{14}C находится на уровне 10^{-19} .

Анализ данных CTF показал, что непрерывная очистка сцинтиллятора позволяет уменьшить внутренний фон в энергетическом окне $250 < E < 800$ кэВ до порога чувствительности. Относительно небольшие размеры CTF ограничивают возможности активной защиты, поэтому в этом энергетическом интервале чувствительность детектора ограничена 10^{-7} Бк/кг. Предел для измерения двух наиболее распространенных и хорошо идентифицируемых радионуклидов — радия и тория — находится на уровне 10^{-9} Бк/кг. В области энергий от 25 до 250 кэВ доминирующим компонентом фона является распад ^{14}C со скоростью $\sim 0,1$ мБк/кг, что соответствует относительному изотопическому содержанию $^{14}\text{C}/^{12}\text{C} \cong 10^{-18}$ г/г. Чувствительность CTF к содержанию изотопов из цепочек радиоактивных распадов ^{238}U (определенная по ^{226}Ra) и ^{232}Th составила 10^{-16} г/г сцинтиллятора соответственно.

Высокая чувствительность, недостижимая при использовании классических методов (масс-спектроскопии или нейтронно-активационного анализа), получена за счет высокой очистки сцинтиллятора и тщательного контроля содержания радиоизотопов в используемых материалах. Большой объем используемого в прототипе сцинтиллятора (4 т) позволил снизить отношение поверхность/объем, ограничивающее возможности лабораторных методов. Важным параметром, определившим успех экспериментов, является тщательно проду-

манная система пассивной (детектор размещен глубоко под землей и окружен слоем воды высокой очистки) и активной (мюонное вето) защиты.

С помощью детектора STF отработаны методы реконструкции событий в жидкосцинтиляционном детекторе большого объема. Получены также параметры, описывающие распространение света в большом объеме сцинтиллятора. Таким образом, экспериментально доказана возможность создания низкофонового детектора низкоэнергетических нейтрино Borexino на основе жидкого органического сцинтиллятора с порогом 250 кэВ по электронам отдачи, ограниченным только присутствием изотопа ^{14}C в сцинтилляторе.

Сотрудниками группы ОИЯИ разработан новый метод восстановления событий в пространстве детектора, что позволило в 2–2,5 раза улучшить пространственное и энергетическое разрешение детектора. Это дало возможность снизить порог регистрации прототипа детектора и разработать модификацию установки, позволяющую в реальном времени исследовать спектр pp -нейтрино от Солнца. Данные с прототипа детектора STF были использованы для получения нижней границы стабильности электрона. Новый улучшенный предел на время жизни составил более $4,6 \cdot 10^{26}$ лет по моде распада $e \rightarrow \gamma + \nu$ (опубликовано в «Phys. Lett. B», 2002. V. 525. P. 29–40). На прототипе STF получены также новые данные о магнитном моменте нейтрино, распаде нейтрино и распаде нуклонов в невидимые каналы.