

На правах рукописи

Орехов Денис Иосифович

Исследование спектра и интенсивности темновых шумов ФЭУ детектора Борексино

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Работа выполнена на кафедре общей ядерной физики физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научные руководители:

доктор физико-математических наук,
профессор
Ишханов Борис Саркисович,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Чепурнов Александр Сергеевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор
Недорезов Владимир Георгиевич,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Спасский Андрей Васильевич

Ведущая организация:

РНЦ “Курчатовский институт”

Защита состоится 27 февраля 2009 г. 15:00 на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 501.001.77 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д.1 стр. 5 – «19 корпус» НИИЯФ МГУ, аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.
Автореферат разослан « 23 » января 2009 г.

Ученый секретарь совета
по защите докторских и
кандидатских диссертаций Д 501.001.77
доктор физико-математических наук,
профессор

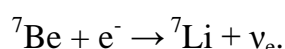
 С.И. Страхова

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

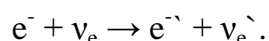
Актуальность работы

Исследование характеристик темновых шумов ФЭУ детектора Борексина необходимо для обеспечения работоспособности установки и корректной регистрации солнечных нейтрино.

Детектор Борексина (Гран Сассо, Италия) предназначен для прямого измерения потока солнечных ${}^7\text{Be}$ нейтрино в режиме реального времени. ${}^7\text{Be}$ нейтрино образуются в реакции pp цикла на Солнце:



90% нейтрино, образующийся в этой реакции, имеют энергию 0,86 МэВ, а 10% - 0,38 МэВ. В эксперименте регистрируются нейтрино с энергией 0,86 МэВ. Детектирование происходит в реакции упругого рассеяния нейтрино на электронах в сцинтилляторе:



Электрон отдачи e'^- вызывает сцинтилляцию, а образовавшиеся в этом процессе фотоны регистрируются ФЭУ. Спектр электронов отдачи реакции имеет вид непрерывного плато, область спада которого приходится на энергию 0,66 МэВ, но из-за ограниченного энергетического разрешения детектора происходит расширение спектра до 0,8 МэВ. В эксперименте регистрируются электроны, взаимодействовавшие с ${}^7\text{Be}$ нейтрино, в диапазоне энергий 0,25 – 0,80 МэВ. Измерение потока нейтрино детектором позволит подтвердить существование нейтринных осцилляций для ${}^7\text{Be}$ нейтрино, уточнить параметры и конкретную модель осцилляций, уточнить механизмы реакций, обеспечивающих светимость Солнца.

Рабочим веществом детектора является органический сцинтиллятор, который контролируется 2212 фотоэлектронными умножителями (ФЭУ). Кроме того в качестве мюонного вето используется еще 208 ФЭУ. Таким образом, фиксирование реакции рассеяния нейтрино на электронах происходит путем обработки сигналов с ФЭУ. В связи с этим состояние ФЭУ необходимо постоянно контролировать. Неотъемлемой характеристикой ФЭУ является темновой шум. Поэтому одним из основных контролируемых параметров в детекторе является интенсивность темнового шума ФЭУ. Слишком высокий или слишком низкий уровень интенсивности темнового шума свидетельствует о неисправности ФЭУ. Своевременное обнаружение подобных событий является основной задачей системы контроля темновых шумов ФЭУ, которая функционирует как независимый модуль в единой системе контроля состояния детектора Борексина.

Следует отметить, что данная система развернута параллельно основной системе сбора физических данных.

Наряду с оперативным контролем уровня темновых шумов, актуальной задачей является вычисление их статистических параметров. Для этого была создана система анализа темновых шумов. Основные направления анализа: вычисление спектра интенсивности темновых шумов отдельных ФЭУ или групп ФЭУ, поиск периодической зависимости сигналов с ФЭУ, поиск долговременных тенденций изменения сигнала. Также можно исследовать корреляции между интенсивностями отдельных ФЭУ или групп ФЭУ, корреляции с параметрами внешней среды: температурой, давлением, уровнем радиационного фона. Для операторов, контролирующих и обслуживающих установку, является полезной информация о характере изменения сигнала ФЭУ при включении и выключении высокого напряжения, подаваемого на ФЭУ, а также информация о влиянии проводимых в детекторе технических работ на состояние ФЭУ. Фиксация и объяснение всех вышеперечисленных явлений является необходимым условием, гарантирующим достоверность полученных в эксперименте данных.

После начала эксплуатации детектора производится сохранение значений интенсивности темновых шумов со всех ФЭУ с периодичностью, достаточной для долговременного контроля состояния ФЭУ. В дальнейшем возможно проведение других видов исследований темновых шумов на основе этих данных.

Цель работы

Целью настоящей диссертационной работы является анализ темновых шумов ФЭУ в детекторе Борексина, в частности, исследование спектра и интенсивности темновых шумов ФЭУ. Данные исследования позволяют быть уверенными в целостности данных, используемых для выявления нейтринных событий в детекторе. Анализ темновых шумов помогает выявлять неисправные ФЭУ, является подтверждением стабильности работы детектора и отсутствия нестандартных характеристик в получаемых с ФЭУ сигналах в период рабочих запусков установки.

Для достижения этой цели была создана система контроля и анализа темновых шумов ФЭУ. С помощью разработанной системы было проведено накопление информации о темновых шумах и анализ собранных данных.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Создана система контроля темновых шумов ФЭУ нейтринного детектора Борексина, позволяющая отслеживать состояние ФЭУ в течение всего времени эксплуатации детектора и обеспечивающая своевременную реакцию на возникновение неисправностей оборудования.

2. Разработана методика анализа данных о темновых шумах ФЭУ для детектора Борексина, необходимая для подтверждения достоверности получаемых с ФЭУ данных о величине потока ${}^7\text{Be}$ солнечных нейтрино на Земле и о наблюдении нейтринных осцилляций, на основании исследования накопленной информации о физических параметрах детектора.
3. Разработана архитектура, позволяющая создавать системы контроля и анализа данных для средних и больших ядернофизических установок на основе проверенных в практической эксплуатации модулей, соединенных стандартизированными интерфейсами и использующих для обмена данными распространенные протоколы.

Научная новизна работы

Впервые создана система контроля и анализа данных о темновых шумах ФЭУ, имеющая распределенную архитектуру, допускающая масштабирование, позволяющая интерактивный доступ через сеть Интернет и использующая стандартизированную шину CAN для обмена данными. Кроме того, на основе методов и технологий, использованных при создании системы контроля темновых шумов ФЭУ, впервые разработана законченная аппаратно-программная платформа для создания систем контроля, накопления и анализа физических данных.

Уникальность разработанной системы состоит в том, что она удостоверяет полученные на детекторе Борексина физические данные о потоке нейтрино и, следовательно, обеспечивает возможность детектирования низкоэнергетических нейтрино на Земле.

Практическая и научная ценность работы

Разработанная система является необходимой для нормального функционирования детектора Борексина. Система будет использоваться для контроля работы детектора в течение всего времени его эксплуатации, т.е. примерно 10 лет. Благодаря своей архитектуре система может быть легко адаптирована для осуществления планируемых в будущем на детекторе задач: поиск гео-нейтрино и реакторных антинейтрино, наблюдение взрывов сверхновых.

Опыт использования системы контроля темновых шумов детектора Борексина позволяет использовать в будущем данную систему как основу для построения распределенных систем контроля в режиме реального времени для других физических установок.

Личный вклад автора

Автор разработал ряд программных модулей, входящими в состав системы контроля темновых шумов ФЭУ детектора Борексина: модуль обработки и

хранения данных, модуль визуализации данных. Кроме того автор участвовал в развертывании системы контроля темновых шумов в Италии и является ответственным за работу ее программной части. Автор создал тестовый стенд, эмулирующий работу системы, в НИИЯФ МГУ в лаборатории группы "систем управления ускорителями и диагностики пучка". Автор разработал методику исследования интенсивности и спектра темновых шумов. Также автор организовал сбор, обработку данных о темновых шумах ФЭУ после запуска детектора и провел их анализ.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на международных конференциях и совещаниях:

1. На конференциях Ломоносов – 2005 и Ломоносов – 2006, Москва, Россия, март 2005 г. и март 2006 г.
2. На 19-ой Международной конференции IWCPA-2005 (International Workshop on Charged Particle Accelerators), Алушта, Крым, Украина, сентябрь 2005 г.
3. На 6-ой Международной конференции «Промышленная сеть CAN-bus и связанные с ней информационные технологии», Мытищи, Россия, март 2007 г.
4. На 57-ой Международной конференции ЯДРО-2007 «Фундаментальные проблемы ядерной физики, атомной энергетики и ядерных технологий», Воронеж, Россия, июнь 2007 г.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 5 статьях и 3 тезисах докладов, представленных на указанных в разделе “Апробация работы” конференциях. Полный список публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Она содержит 77 рисунков и 17 таблиц. Список цитируемой литературы включает 51 наименование. Общий объем диссертации составляет 148 страниц.

Содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи диссертации, новизна и практическая значимость полученных результатов. Дано краткое описание проблемы детектирования солнечных нейтрино, детектора Борексино, важности контроля сигнала с ФЭУ для работы детектора и системы контроля и анализа темновых шумов ФЭУ в детекторе.

В первой главе описан механизм детектирования солнечных нейтрино. Согласно Стандартной Солнечной Модели (ССМ) солнечная светимость поддерживается главным образом за счет энергии, которая освобождается в результате протон-протонного (pp) цикла (см. рис. 1).

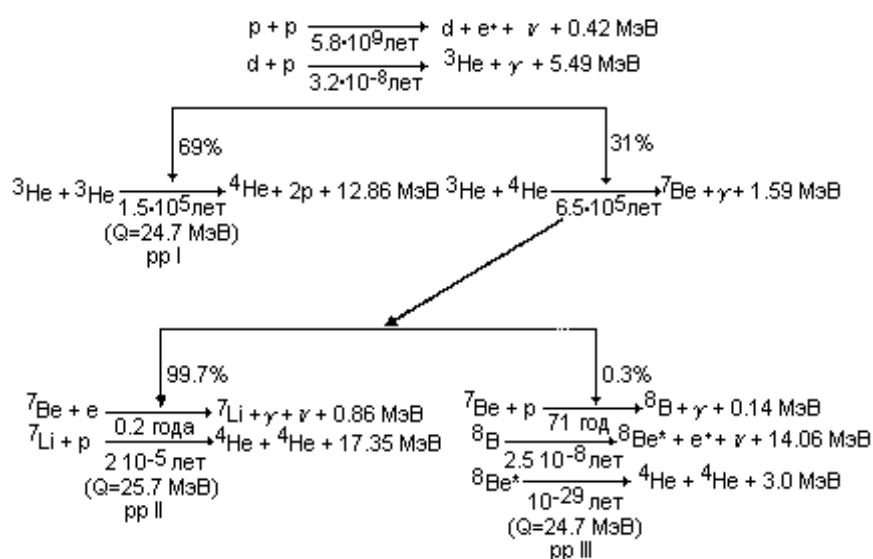


Рис. 1. Схема основных реакций протон-протонного (pp) цикла на Солнце.

Исходя из энергии, выделяющейся в ядерных реакциях pp цепочки, можно рассчитать энергетический спектр нейтрино, образующихся на Солнце (рис. 2). Энергия солнечных нейтрино находится в диапазоне 0 — 16 МэВ. Для этих энергий значение сечения взаимодействия составляет $\sigma \approx 10^{-44} - 10^{-45} \text{ см}^2$. При таком сечении пробег нейтрино в твердой среде равняется $\approx 10^{15} \text{ км}$. Основная цель наблюдения солнечных нейтрино на Земле - непосредственная проверка модели термоядерных реакций на Солнце, так как только нейтрино приносят информацию о процессах в центре Солнца.

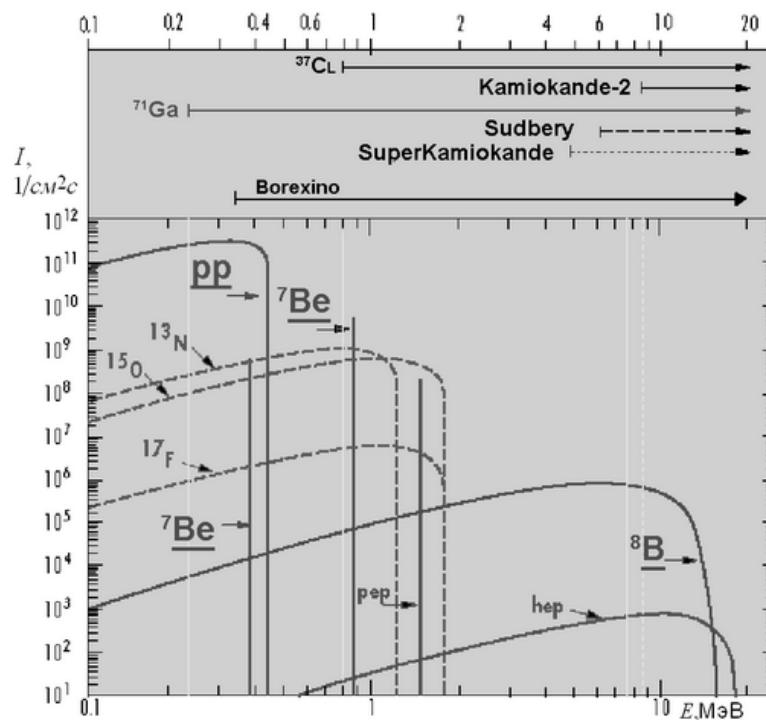


Рис. 2. Рассчитанный спектр солнечных нейтрино. Показаны пороги регистрации нейтрино различными методами, а также пороги регистрации для некоторых нейтринных детекторов.

Существуют три основных способа детектирования нейтрино:

1. Радиохимический
2. Рассеяние нейтрино на электронах
3. Поглощение нейтрино.

Радиохимические детекторы по используемому в них активному веществу разделяются на 2 вида: хлорные и галлиевые. Наиболее распространенные детекторы нейтрино, основным процессом в которых является рассеяние на электронах, - это черенковский и сцинтилляционный. Основным детектирующим элементом в таких детекторах является ФЭУ. Оба этих способа детектирования – прямые (фиксируется непосредственно выбивание электрона), оба дают возможность точного определения времени прилета нейтрино и оба наиболее чувствительны к электронным нейтрино. Но сцинтилляционный детектор имеет важное достоинство - низкий порог регистрации (до 50 КэВ). При этом сцинтилляционный детектор имеет ряд недостатков: невозможно определить направление движения исходного нейтрино по направлению движения образовавшихся фотонов, более высокая стоимость вещества детектора и намного более строгие требования к радиационной чистоте материалов детектора.

Точное детектирование потоков всех ароматов нейтрино возможно для детекторов, использующих реакции поглощения. Реакции поглощения происходят за счет слабого взаимодействия и, в зависимости от того, через какие токи идет реакция – заряженные или нейтральные, реакция может быть чувствительна либо только к электронным нейтрино, либо ко всем ароматам нейтрино.

В таблице 1 приведены данные об основных проведенных на данный момент экспериментах по детектированию солнечных нейтрино.

Таблица 1. Данные о некоторых проведенных экспериментах по детектированию солнечных нейтрино.

Эксперимент	Год	Тип детектора	Тип нейтрино	Отношение числа зарегистрированных нейтрино к теоретическому значению (CCM), %
Homestake	1967	радиохимический (хлорный)	^8B -нейтрино	$33 \pm 3 \pm 5$
Kamiokande-II	1988	черенковский	^8B -нейтрино	$54 \pm 8^{+10}_{-7}$
SuperKamiokande	1996	черенковский	^8B -нейтрино	$47,5 \pm 0,8 \pm 1.3$
SAGE	1990	радиохимический (галлиевый)	pp-нейтрино и др.	$55,0 \pm 14,0 \pm 3.0$
SNO	1993	черенковский (на тяжелой воде)	^8B -нейтрино	$F^{\text{NC}}(\nu_x) = 5,09^{+0,44+0,46}_{-0,43-0,43} \times 10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ $F_{\text{CCM}}(\nu_e) = 5,05^{+1,01}_{-0,81} \times 10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$

Таким образом, результаты проведенных экспериментов показывают дефицит потока солнечных нейтрино, измеряемого на Земле. Существуют два основных объяснения этой проблемы: либо неверна CCM, либо природа нейтрино имеет отличия от того, как она описана в Стандартной модели электрослабых взаимодействий. Результаты гелиосейсмологических наблюдений и нейтринных экспериментов говорят в пользу второго варианта. При этом варианте наиболее простым объяснением представляются нейтринные осцилляции, существование которых предсказывается теорией нейтрино с конечной массой покоя. Часть солнечных электронных нейтрино, проходя через Солнце и пространство между Солнцем и Землей, превращаются в нейтрино других ароматов в результате вакуумных осцилляций и осцилляций в веществе Солнца. Данные, собранные в SNO, Homestake, SAGE, SuperKamiokande, Борексино наиболее точно соответствуют МСВ (Михеева-Смирнова-Вольфенштайна) механизму нейтринных осцилляций в веществе.

Во второй главе описывается детектор Борексино. Борексино – сцинтилляционный детектор нейтрино низких энергий, находящийся в Гран Сассо,

Италия (LNGS). Основной целью эксперимента является прямое измерение потока ${}^7\text{Be}$ солнечных нейтрино с энергией 0,86 МэВ в режиме реального времени.

Детектор Борексино состоит из 2 частей: детектор нейтринных событий (внутренний детектор), который находится внутри стальной сферы, и система мюонного вето (внешний детектор), которая находится снаружи стальной сферы (рис. 3).

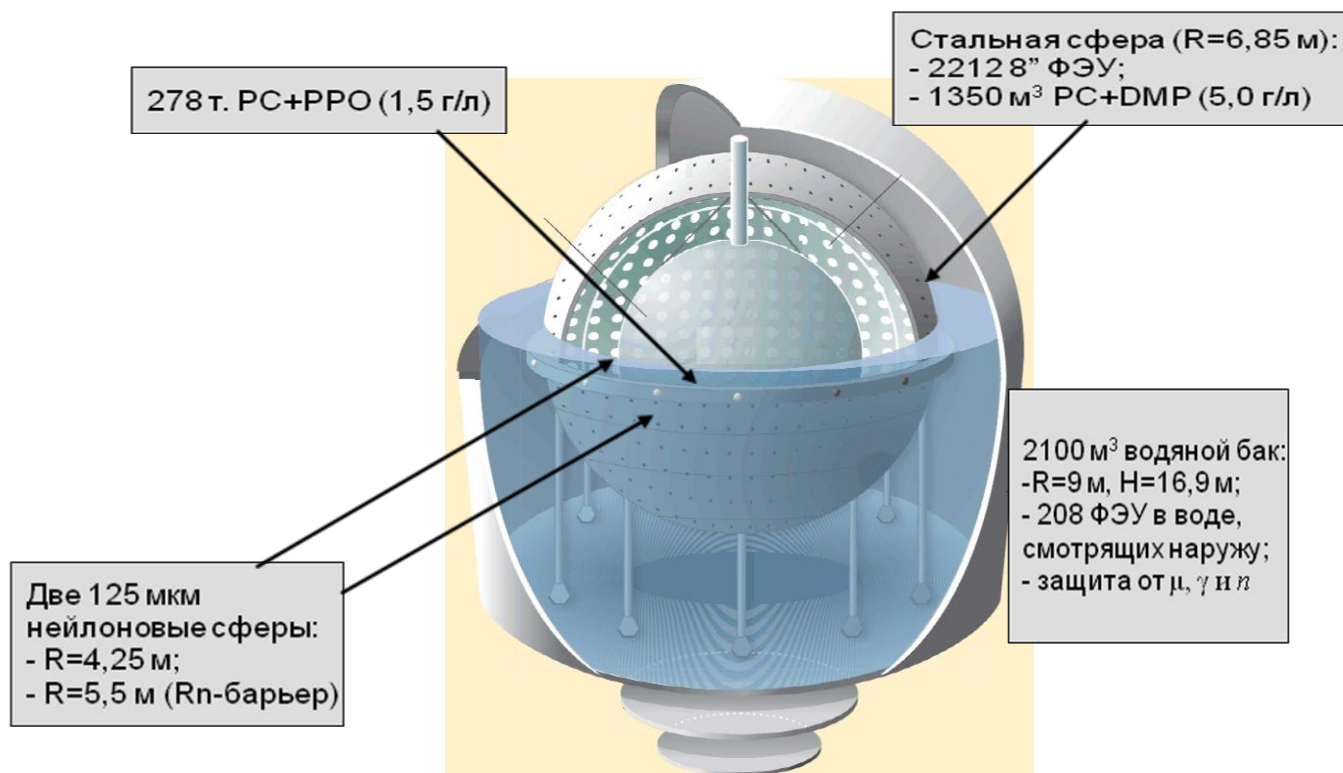


Рис. 3. Схема детектора Борексино.

Сцинтиллятор состоит из псевдокумола (1,2,4-триметилбензина) с добавлением 0,1% PPO (2,5-дифенилоксазола). Сцинтилляционный выход данной смеси довольно высок и примерно равен 11 000 фотонов/МэВ. Эффективное число фотонов, которые регистрируются в детекторе при энергии события 1 МэВ, составляет 500. Внутренний детектор просматривается 2212 ФЭУ, находящимися на стальной сфере и направленными внутрь детектора, а внешний - 208 ФЭУ, находящимися на внешней стенке стальной сферы и на нижней стенке внешнего стального резервуара. Последние ФЭУ служат для детектирования мюонов по черенковскому излучению, испускаемому ими при пересечении внешнего водяного буфера.

Схема обработки электронного сигнала с ФЭУ, позволяет измерять временные характеристики фотонов, необходимые для нескольких ключевых задач: пространственной реконструкции событий, отбора фоновых событий по форме импульса. Ожидаемое согласно ССМ количество регистрируемых событий в диапазоне энергий 0,25 – 0,80 МэВ составляет примерно 55 нейтрино в день, из

которых 43 – это ${}^7\text{Be}$ -нейтрино. Предполагается также детектирование нижней части спектра ${}^8\text{B}$ -нейтрино. Для регистрации нейтринного события служит схема совпадений. Только совпадение импульсов в 15-60 ФЭУ в течение 60 нс служит основанием для регистрации физического события в объеме детектора.

Так как ${}^7\text{Be}$ -нейтрино имеют низкую энергию, то ключевой особенностью детектора является очень низкий уровень фонового излучения, вызванного естественной радиацией, причем как проникающего из внешней среды, так и продуцируемого частями детектора. Наибольший вклад в фоновое излучение вносят следующие процессы:

1. Естественная радиоактивность веществ, из которых изготовлен детектор:
 - а) тяжелые изотопы ${}^{40}\text{K}$, ${}^{238}\text{U}$ и ${}^{232}\text{Th}$ и продукты их распада;
 - б) радиоактивные благородные газы: ${}^{222}\text{Ra}$ и ${}^{85}\text{Kr}$;
 - в) радиоактивный углерод ${}^{14}\text{C}$, содержащийся в сцинтилляторе.
2. Процессы, порождаемые в детекторе космическими мюонами:
 - а) непосредственное излучение при взаимодействии с веществом детектора;
 - б) наведенная мюонами радиоактивность (изотоп ${}^{11}\text{C}$, ${}^{10}\text{C}$).
3. Внешнее гамма-излучение:
 - а) от окружающих детектор горных пород;
 - б) излучение внешних частей детектора.

Все перечисленные источники фонового излучения в процессе разработки детектора были уменьшены до уровня, позволяющего детектирование ${}^7\text{Be}$ нейтринных событий. Создание технологии использования сцинтилляции в детекторе с объемом более ста тонн для низкоэнергетичной нейтринной спектроскопии является одним из главных достижений коллаборации Борексино. Измерения, выполненные на детекторе Борексино, могут подтвердить или опровергнуть любой из возможных на сегодня механизмов нейтринных осцилляций.

Схема электроники детектора изображена на рисунке 4. Системы контроля темновых шумов внутреннего и внешнего детекторов, а также аналоговый сумматор для WFD созданы совместно РИЦ "Курчатовский институт" и НИИЯФ МГУ. Особенностью данной системы является ее независимость от основной системы регистрации событий в детекторе. Система контроля работает непрерывно в период действия детектора, осуществляя наблюдение даже между сериями измерений. Система контроля помогает проводить отладку и калибровку детектора.

Все программное обеспечение детектора Борексино можно разделить на 2 группы:

1. online сбор и обработка данных, управление и контроль детектора;

2. offline реконструкция событий.



Рис. 4. Блок-схема аппаратной части системы контроля и сбора данных Борексино.

Программное обеспечение, управляющее и контролирующее работу детектора, включает в себя более 100 постоянно запущенных приложений и командных скриптов, выполняющих следующие основные задачи:

1. Считывание данных о событиях в объеме детектора;
2. Построение структур событий в детекторе, используемых в offline анализе;
3. Управление отдельными сессиями сбора данных;
4. Управление аппаратной частью детектора (Slow Control);
5. Online мониторинг состояния детектора;
6. Online мониторинг темновых шумов в детекторе.

Сбор данных разделен на отдельные сессии. Каждая сессия характеризуется своей конфигурацией оборудования, параметрами срабатывания триггеров

событий. Сессии бывают рабочие, в течение которых происходит сбор данных для физического анализа, и калибровочные. Стандартная длительность сессии составляет примерно 6 часов.

Принцип работы online системы следующий: в каждой стойке, контролирующей данный с группы ФЭУ, находится PowerPC (PPC) компьютер, собирающий данные по шине VME из платы сбора данных по срабатыванию триггера (рис. 4). После чего данные проходят первоначальную обработку и отсылаются по локальной сети Ethernet (скорость сети 1 Гбит/с) на удаленный PC компьютер (x86), который формирует структуры событий и записывает их на диск.

Для offline обработки данных используются скрипты, написанные с использованием пакета для сбора и обработки экспериментальных данных ROOT, созданного в ЦЕРН.

В главе 3 описывается система контроля темновых шумов ФЭУ. В детекторе Борексина для регистрации фотонов, возникающих в результате сцинтилляций, используется большое количество ФЭУ. Известно, что ФЭУ продуцирует спорадические импульсы, каждый из которых неотличим от импульса, несущего информацию о событии. Это и есть темновой шум ФЭУ. Одной из основных причин темнового шума является термоэмиссия с фотокатода и динодов. О темновом шуме известно, что его интенсивность, приведенная к единице площади фотокатода, зависит в основном от технологии изготовления фотокатода и его рабочей температуры. Также он может быть подвержен влиянию других физических факторов: давления, радиационного уровня в детекторе.

Основные требования к ФЭУ в процессе его эксплуатации – это низкий уровень шумов и стабильность работы. В детекторе Борексина ФЭУ внутреннего и внешнего детекторов работают в однофотозлектонном режиме. Выбор однофотозлектонного режима работы ФЭУ обусловлен малыми энергиями образующихся частиц. В данном режиме работы на выходе регистрируется каждый импульс, возникающий в ФЭУ либо в результате попадания электрона на фотокатод, либо имеющий природу темнового шума.

Темновые шумы определяют порог чувствительности ФЭУ к наблюдаемым событиям и при определенных условиях способны сделать работу детектора невозможной. Для детектора Борексина это особенно важно в силу редкости наблюдаемых событий – детектирования нейтрино. Поэтому система контроля темновых шумов ФЭУ детектора Борексина необходима для мониторинга состояния детектора и его готовности для выполнения целевой функции по сбору физических данных.

Система контроля темновых шумов ФЭУ для нейтринного детектора Борексина предназначена для выполнения следующих основных задач:

1. сбор данных с последующим сохранением;

2. поддержание установки в рабочем состоянии;
3. анализ накопленных данных.

В основу созданной для решения этих задач системы положен принцип независимых программных и аппаратных модулей, взаимодействующих через стандартные интерфейсы.

Детектор Борексина можно отнести к классу больших систем из-за его размеров и количества используемых в нем устройств и подсистем. Его основные особенности:

- состоит из нескольких подсистем (основная и мюонного вето), отдельные модули которых расположены на большой площади;
- используется большое количество разнообразных датчиков (примерно 2500 ФЭУ), состояние которых необходимо контролировать в ходе эксперимента;
- несмотря на тщательный отбор электронных компонентов, существует вероятность их выхода из строя, что может привести к потере данных и искажению результатов эксперимента;
- в процессе эксперимента происходит получение огромного количества “сырых” данных, которые позже обрабатываются с целью извлечения физических данных; в системе контроля темновых шумов Борексина основным контролируемым параметром является частота темнового шума с 2500 ФЭУ, измеряемая один раз в секунду;
- так как процессы сбора и анализа данных разнесены во времени, то собранную и предварительно обработанную информацию необходимо сохранить для дальнейшего анализа;
- детектор должен иметь встроенные средства контроля функционирования;
- система не должна быть слишком дорогой, поэтому в целях уменьшения стоимости оптимальным решением является применение одной из стандартных промышленных шин для связи компонентов установки.

Чтобы обеспечить оперативный доступ к данным для всех участников коллаборации Борексина система должна обеспечивать возможность удаленной работы с данными. Для этого наиболее удобно использовать глобальную сеть Internet, организуя доступ к накопленным данным и визуализацию текущего состояния установки при помощи WEB-интерфейса.

Для контроля состояния детектора требуется измерение различных физических параметров: интенсивности темновых импульсов ФЭУ, температуры и напряжения питания счетчиков. В системе используется частотный интерфейс работы с данными. При использовании этого интерфейса аналоговый параметр сразу генерируется или преобразуется в сигнал частоты. При передаче сигнала в частотной форме технически проще и дешевле обеспечить гальваническую развязку при многоканальном сборе данных в больших распределенных системах. Универсальным входным преобразователем в данном архитектурном решении является модуль с несколькими входами для измерения частоты. Модули объединяются стандартной сетью, обеспечивая возможность построения иерархической распределенной системы и приближения первичных преобразователей к датчикам.

Для связи модулей нашей системы была выбрана шина CAN (Controller Area Network). В силу своих особенностей: побитовый арбитраж, дифференциальный режим передачи сигналов, высоконадежный алгоритм обработки и фиксации ошибок, высокая скорость передачи данных (до 1 Мбит/с) и помехоустойчивость - CAN хорошо подходит для создания распределенных систем сбора данных в реальном времени. Гибкость CAN достигается за счет простого подключения и отключения от шины CAN-модулей. Современный стандарт CAN 2.0B описывает только два нижних уровня эталонной модели ISO/OSI: физический и канальный. Поэтому для построения системы передачи данных требуется применение протокола прикладного уровня, реализация которого определяет способ адресации узлов сети, отвечает за распределение адресов и приоритетов устройств и обработку передаваемых данных. Из множества существующих был использован протокол DeviceNet, который широко применяется в области АСУ ТП. Отличительной особенностью этого протокола является открытость спецификации и наличие соответствующих международных стандартов.

Архитектурной особенностью системы является возможность разделения системы сбора данных на произвольное число независимых подсистем, являющихся отдельными сетями CAN. В каждой из этих подсистем может измеряться до 256 каналов интенсивности с помощью нескольких контроллеров-частотомеров. Такая схема обеспечивает логическую группировку датчиков по географическому или функциональному признаку. Контроллеры для каждой из подсистем могут иметь отличающиеся технические характеристики (число каналов, диапазон измеряемых частот) в зависимости от конкретной физической задачи, но при этом имеют общую архитектуру и единое представление в системе. Предполагается, что к одному контроллеру подключаются датчики, расположенные близко друг к другу. Каждый из частотомеров имеет CAN-контроллер и подключен к сети в качестве Slave-устройства. Master-устройством является управляющий компьютер системы контроля темновых шумов. Данные от управляющего компьютера поступают на сервер системы контроля, где происходит их хранение и выдача по запросам клиентских терминалов.

Аппаратное обеспечение системы контроля и анализа данных о темновых шумах представляет собой 2 CAN подсети. Первая «внутренняя» сеть частотомеров обслуживает внутренний детектор, состоит из 14 частотомеров и управляющего компьютера с PCI CAN-контроллером. Управление CAN-контроллером осуществляется через универсальный драйвер CHAI (CAN Hardware Abstraction Interface), разработанный в компании Марафон. Каждый частотомер получает на вход 16 каналов с суммированным аналоговым сигналом от 12 ФЭУ. Используются только 14 из 16 каналов. Каждый модуль-частотомер содержит дискриминатор, счетчик импульсов, CAN контроллер и блок питания (см. рис. 4). По сети CAN кроме суммы сигналов с 14 каналов передается также напряжения блока питания +5 вольт и -5 вольт и его температура. Вторая «внешняя» сеть частотомеров обрабатывает данные о темновых шумах в системе мюонного вето. В качестве главного узла сети используется тот же управляющий компьютер, что и для «внутренней» сети. Сигнал с «внешней» сети подается на 2-й канал двухканального CAN-контроллера управляющего компьютера. «Внешняя» сеть

организована так: 4 частотомера по 64 канала в каждом, из которых 8 каналов не используются. Каждый канал «внешней» сети получает сигнал от одного ФЭУ.

Программное обеспечение системы контроля и анализа данных о темновых шумах (Рис. 5) построено по многоуровневой схеме. В частности, в нем можно выделить 4 функциональных уровня: аппаратное ПО (firmware), сбор данных, обработка данных и отображение данных, - и 6 функциональных подсистем: сбора данных, имитации реальных данных, обработки данных, сохранения данных, визуализации данных, offline анализа. Программные модули различных подсистем могут находиться на разных компьютерах.

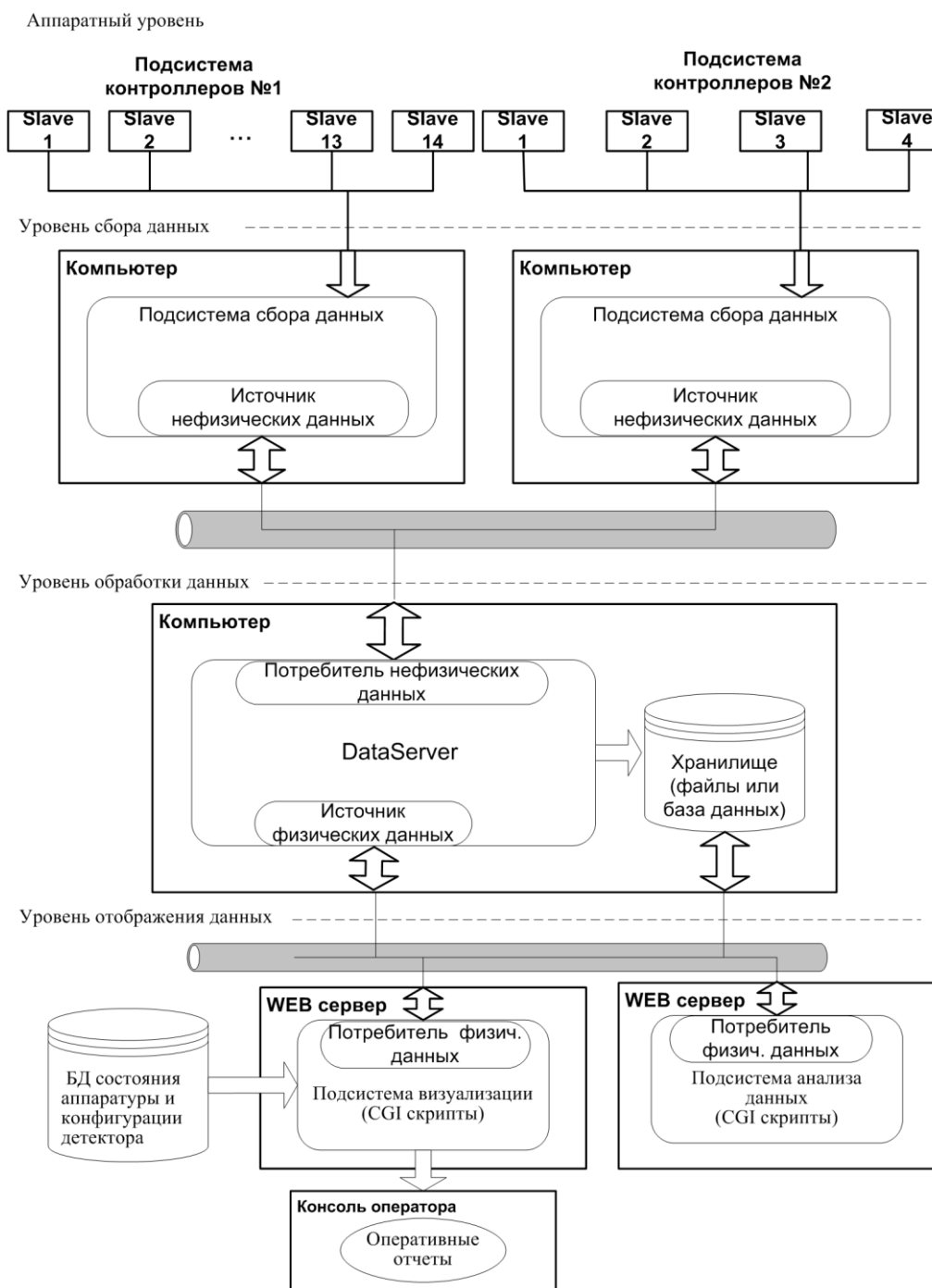


Рис. 5. Структурная схема программного обеспечения системы контроля.

Такая архитектура обеспечивает возможность расширения системы и служит для балансировки нагрузки на компоненты системы. Кроме того, распределенная схема наилучшим образом подходит для системы, выполняющей такие неоднородные и разделенные во времени задачи, как контроль состояния, накопление и анализ данных.

Подсистемы сбора, обработки и имитации данных написаны на языке ANSI C для операционной системы Linux. Для хранения данных используется реляционная система управления базами данных (СУБД) PostgreSQL. Применение реляционной СУБД для хранения данных позволяет упростить выборку данных для анализа, используя стандартизированный язык запросов ANSI SQL. Кроме того, гибкость и богатые возможности SQL по сортировке, группировке и выборке данных обеспечивают все потенциальные потребности при разработке подсистемы анализа. Модули визуализации и анализа данных написаны с использованием CGI скриптов на языках Perl и PHP. Пользовательский интерфейс этих подсистем представляет собой динамически генерируемые WEB-страницы, просмотр которых возможен в любом современном браузере. Подсистема анализа данных генерирует запросы к СУБД для получения информации о контролируемой величине за произвольный период времени. Информация может быть представлена как в числовой форме, так и в виде графиков. Данный модуль предназначен для первичного анализа данных. Для дальнейшего исследования информация выгружается во внешний файл и передается в какой-либо математический пакет.

Архитектура аппаратного и программного обеспечения системы позволяет добавление новых модулей-частотомеров и дополнительных управляющих компьютеров CAN. Для измерения физических параметров, отличных от частоты, в систему можно добавить модули-преобразователи «параметр-частота», соединенные по шине CAN. Система может осуществлять сбор и сохранение физических данных в автоматическом режиме. К накопленным данным может быть организован удаленный доступ для контроля критических значений наблюдаемых параметров, также возможна удаленная выгрузка данных для их анализа.

При этом созданная система имеет ряд ограничений в отношении измеряемого сигнала. Характерное время изменения контролируемых параметров должно быть:

$$T_{\text{изм}} \geq 1 \text{ с.}$$

Измеряемое значение интенсивности при этом должно лежать в диапазоне:

$$I_{\text{изм}} \in [10; 0,5 \times 10^6] \frac{\text{имп}}{\text{с}}.$$

Точность измерения составляет 1 имп/с в средней части рабочего диапазона, а на границах этого диапазона погрешность измерения составляет не более 10%. По числу одновременно

измеряемых каналов ограничения накладывают характеристики шины CAN на физическом уровне, в частности, максимальная скорость передачи, а также спецификации протоколов верхнего уровня в части ограничений на возможное число узлов в одной сети.

Архитектура и все вышеперечисленные характеристики системы упрощают ее адаптацию к другим ядернофизическим установкам, в которых требуется контролировать большое число медленно изменяющихся физических параметров, например, таких как частота, температура, напряжение, давление. Поэтому систему можно рассматривать как платформу для построения систем контроля больших, средних и малых ядернофизических установок.

В главе 4 описывается процедура анализа данных о темновых шумах ФЭУ детектора Борексина и результаты анализа. Были проведены следующие исследования темновых шумов ФЭУ детектора Борексина:

1. Получение общих характеристик темновых шумов;
2. Изучение влияния темновых шумов на частоту срабатывания нейтринного и мюонного триггеров;
3. Поиск шумящих каналов в детекторе;
4. Оценка форма спектра сигнала с ФЭУ (оценка периодических вариаций с использованием Фурье-анализа);
5. Поиск корреляций между каналами и группами каналов ФЭУ;
6. Поиск зависимостей сигнала с ФЭУ от внешних макроскопических параметров;
7. Изучение влияния на ФЭУ переходных процессов в детекторе;
8. Изучение временных тенденций для сигнала с ФЭУ.

Решение вышеперечисленных задач наряду с постоянной работой системы контроля темновых шумов ФЭУ является одним из важных аргументов, подтверждающих достоверность физических результатов, полученных после обработки набранных на детекторе данных.

Если рассматривать значение интенсивности темнового шума за длительный период наблюдения, то оно будет флуктуировать около определенного среднего значения. Известно, что если на результаты измерений оказывают влияние большое число случайных факторов, то вся совокупность измерений имеет в качестве предельного распределения симметричную функцию Гаусса:

$$G_{x\sigma}(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(n-x)^2}{2\sigma^2}}.$$

Учитывая то, что процессы термоэмиссии, автоэмиссии и др. являются по своей природе случайными, то распределение интенсивности темнового шума можно с высокой точностью аппроксимировать нормальным распределением. Отметим, что распределение интенсивности темновых шумов при переходных процессах в ФЭУ может существенно отличаться от нормального распределения.

Предварительный анализ данных показал, что значение интенсивности темновых шумов по одному каналу внутреннего детектора, т.е. сигнал с 12 ФЭУ, лежит в диапазоне:

$$I \sim (0,05 \div 3) \times 10^4 \frac{\text{импульсов}}{\text{сек}}.$$

Сигнал с отдельного ФЭУ мы считаем нормально распределенным, поэтому и их сумму можно рассматривать как случайный сигнал, подчиняющийся нормальному распределению. Большинство ФЭУ внутреннего детектора одинаковы по своей конструкции, а число ФЭУ в одном канале частотомера для большинства каналов равняется 12. Поэтому средняя интенсивность темнового шума одного ФЭУ в детекторе Борексина равняется:

$$I_1 \sim 0,4 \div 2,5 \times 10^3 \frac{\text{импульсов}}{\text{сек}}.$$

В виду больших количества данных о темновых шумах (порядка 160 Гб в год для детектора Борексина) было проведено исследование возможности уменьшения объема хранимых данных. Возможные способы уменьшения объема данных:

1. Автоматическое архивирование данных;
2. Усреднение значений интенсивности в канале по N при сохранении данных.

Было исследовано распределение интенсивностей темнового шума для каналов внутреннего детектора (рис. 6).

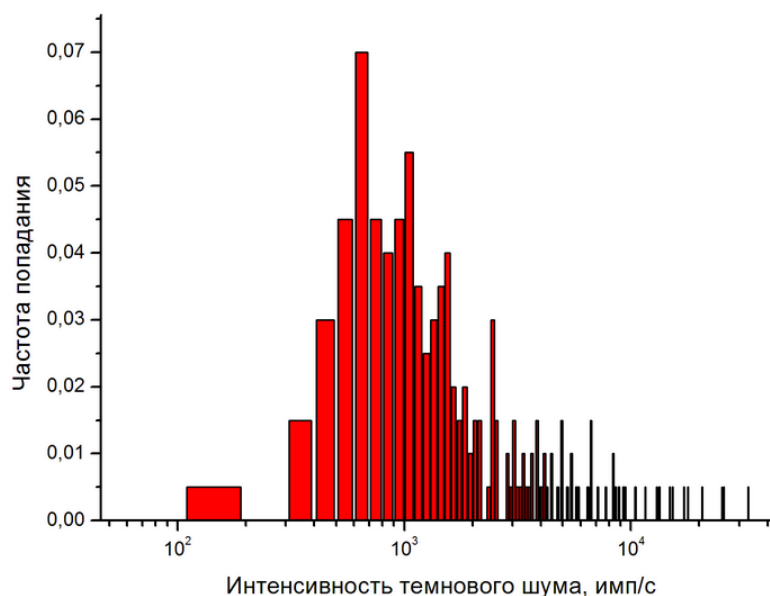


Рис. 6. Распределение каналов внутреннего детектора по значениям интенсивности темновых шумов.

Все каналы можно разделить на 3 группы величине интенсивности и плотности распределения каналов: «нормальные» (интенсивность менее $(2-3) \times 10^3$ имп/с), «активные» (интенсивность менее $(1-2) \times 10^4$ имп/с), «шумящие»: (интенсивность более $(1-2) \times 10^4$ имп/с). Доля «нормальных» каналов - примерно 65%, «активных» - 25%, «шумящих» - менее 5-10 %. «Активные» каналы не влияют на его способность фиксировать физические события, хотя и отличаются от «нормальных» по своим характеристикам. «Шумящие» каналы в детекторе необходимо проверять с целью уменьшения в них уровня шума. Особенностью «шумящих» каналов является то, что дисперсия интенсивности шума в таких каналах значительно больше, чем среди остальных групп каналов.

В детекторе Борексина существуют два типа триггеров событий: основной и мюонный. Средняя наблюдаемая частота срабатывания триггеров всех типов в детекторе составляет ~ 15 Гц. Условие срабатывания основного триггера: за $T_{\text{триг}} = 60$ нс должен быть детектирован сигнал как минимум в $N_0 = 15$ ФЭУ. Параметры $T_{\text{триг}}$ (временное окно триггера) и N_0 (пороговое число сработавших ФЭУ) являются настраиваемыми для каждой сессии, вышеприведенные значения являются типичными. Как уже было сказано, типичная интенсивность темнового шума составляет $I_1 \sim 0,4 \div 2,5 \times 10^3 \frac{\text{импульсов}}{\text{сек}}$. Возьмем в качестве усредненного значения

$I_1 \sim 10^3 \frac{\text{импульсов}}{\text{сек}}$. Учитывая случайный характер большинства событий, приводящих к генерации фотоэлектрона, можно считать, что импульсы распределены равномерно по времени. Тогда при полученной интенсивности средний период одного импульса темнового шума равен $T_{\text{ш}} = 1/10^3 = 10^{-3}$ с = 10^6 нс, что в 10^4 раз больше, чем период срабатывания триггера $T_{\text{триг}}$. Вероятность того, что в N_0 ФЭУ импульс темнового шума попадет в один конкретный интервал T_0 , длина которого равна $T_{\text{триг}}$, т.е. возникновения «шумового» события в детекторе, составляет:

$$P_{\text{ми}} = \sum_1^{I_{\text{ми}}} (P_1)^{N_0} \times \frac{N_{\text{ФЭУ}}!}{N_0! \times (N_{\text{ФЭУ}} - N_0)!} = 10^{-22},$$

где P_1 -вероятность появления сигнала в определенный интервал T_0 в одном ФЭУ, а N – общее число ФЭУ во внутреннем детекторе. При этом события попадания в любой интервал считаем равновероятным, события одновременного срабатывания N_0 ФЭУ считаем независимыми. Таким образом, за все планируемое время работы детектора $t = 10$ лет $\sim 3 \times 10^8$ с вероятность появления хотя бы одного «шумового» события не превысит:

$$P_{10} = \sum_1^t P_{\text{ми}} \sim 10^{-13}.$$

В диссертации был рассмотрен также случай «шумящих» каналов. В этом случае, все каналы темнового шума имеют интенсивность темнового шума порядка

10^5 импульсов/с (при максимальной измеряемой интенсивности 5×10^5 импульсов/с). Тогда вероятность «шумового» события становится большой:

$$P_{ми} = 10^{-3}.$$

Т.е. за время в $t_1=10^3$ с ~ 17 мин возможно появление одного «шумового» события. Для сравнения, среднее время регистрации одного нейтринного события в детекторе при расчетной скорости регистрации $F = 49 \pm 4_{\text{теор}}$ событий/(день \cdot 100 т) и весе активного вещества детектора порядка 100 тонн составляет примерно 30 минут.

Другим важным параметром нейтринного триггера помимо временного окна является период $T_{\text{совп}}=7,2$ мкс, в течение которого фиксируется заряд и время прихода импульсов для всех сработавших ФЭУ внутреннего детектора. Данная информация используется для отсеечения фоновых событий по схеме запаздывающих совпадений. Поэтому был рассмотрен случай, когда интенсивность темнового шума в детекторе повыситься в 10 раз по сравнению с нормальным уровнем (экспериментально выяснено, что отдельные каналы с таким уровнем шума появляются в детекторе):

$$N_0^{\text{тш}} \sim I_0 \times T_{\text{совп}} \times N_{\text{ФЭУ}} = 16 \text{ и } N_1^{\text{тш}} \sim I_1 \times T_{\text{совп}} \times N_{\text{ФЭУ}} = 160.$$

Такое повышение потенциально может оказать влияние на точность определения запаздывающих событий.

При первоначальном наблюдении за состоянием темнового шума в детекторе было обнаружено несколько «шумящих» каналов, уровень шума в которых в течение долгого времени в 10 и более раз превышал уровень шума в большинстве каналов. Был выработан алгоритм поиска «шумящих» каналов и выяснения причины «шума» для предотвращения появления подобных каналов:

1. Определение «шумящего» канала с помощью системы контроля темновых шумов;
2. Получение списка подозрительных ФЭУ;
3. Отключение всех ФЭУ из списка по очереди до выявления «шумящего»;
4. Проверка кабелей, соединяющих данный ФЭУ с Front-End;
5. Подключение ФЭУ к другому Front-End;

6. Подключение сигнала от группы ФЭУ к другому каналу контроллера-частотомера темнового шума;
7. Проверка других компонент системы, отвечающих за обработку сигнала.

Если все проверки не давали результата, это означало, что неисправен сам ФЭУ, и его необходимо отключить. Для большинства шумящих каналов причиной высокого шума оказались либо контактные явления в соединительных кабелях, либо неисправность в интеграторе сигнала с ФЭУ по 12 во Front-End. Данная неисправность приводила к тому, что в интеграторе начинался процесс самовозбуждения, что приводило к появлению на выходе сигнала с высокой амплитудой. Таким образом, был создан инструмент, позволяющий своевременно находить «шумящие» ФЭУ и возвращать их в работоспособное состояние.

Была проведена проверка гипотезы гауссового характера темнового шума за время характерное для одной рабочей сессии. Очевидно, что интенсивность темнового шума строго не подчиняется нормальному распределению. Причиной этого являются переходные процессы в детекторе и другие случайные факторы. Кроме того, для внутреннего детектора играет роль то, что сигнал в канале уже представляет собой сумму сигналов с ФЭУ, каждый из которых имеет индивидуальные характеристики. Была произведена аппроксимация данных по всем каналам внутреннего детектора функцией Гаусса, которая показала высокую степень корреляции амплитудного спектра с функцией распределения Гаусса (рис. 7). Для каналов внутреннего детектора интенсивность темнового шума подчиняется распределению Гаусса, значение приведенного критерия хи-квадрат составляет порядка 10^{-6} - 10^{-8} , коэффициента детерминации, равного квадрату коэффициента корреляции, $\sim 0,98$ - $0,99$.

Также был произведен Фурье анализ интенсивности темнового шума для каналов внутреннего детектора, который показал отсутствие четко выраженной периодичности сигнала (рис. 8). Это говорит об отсутствии паразитных колебательных процессов в объеме детектора.

Был произведен поиск зависимостей между изменением интенсивности темновых импульсов в различных каналах внутреннего детектора. Нахождение строгой корреляции сигналов из разных ФЭУ или групп ФЭУ означает наличие в детекторе неких паразитных связей, которые могут помешать его нормальной работе или наличие неких источников фотонов в отдельных областях детектора, что ставит под вопрос результаты, полученные в эксперименте.

Ввиду большого количества данных была проведена проверка на возможность уменьшения количества данных для расчета. Предварительно были рассчитаны корреляции между каналами с периодом измерения интенсивности 1 с.

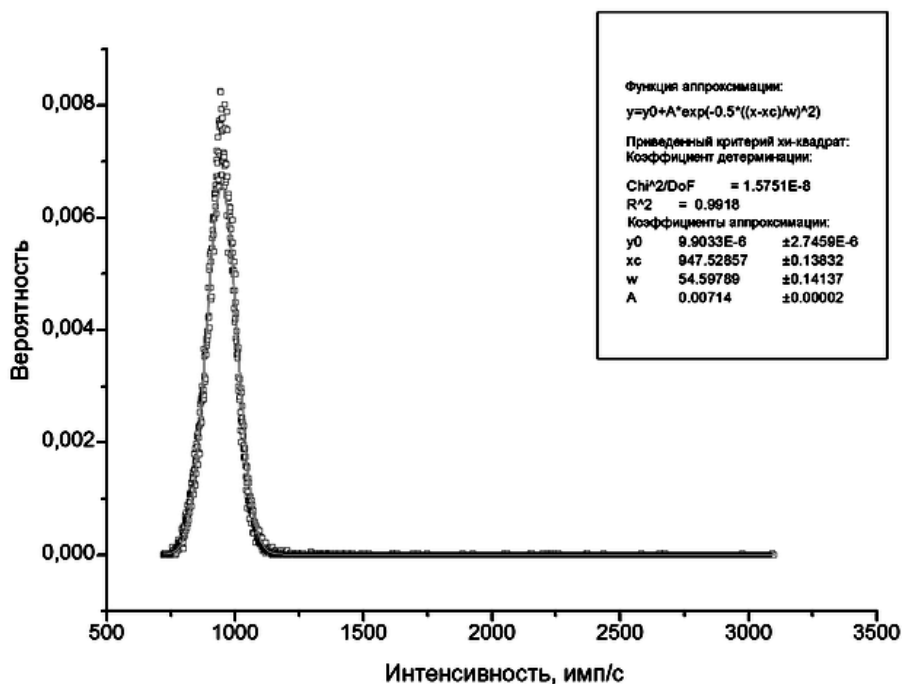


Рис. 7. Аппроксимация спектра интенсивности темновых шумов функцией Гаусса.

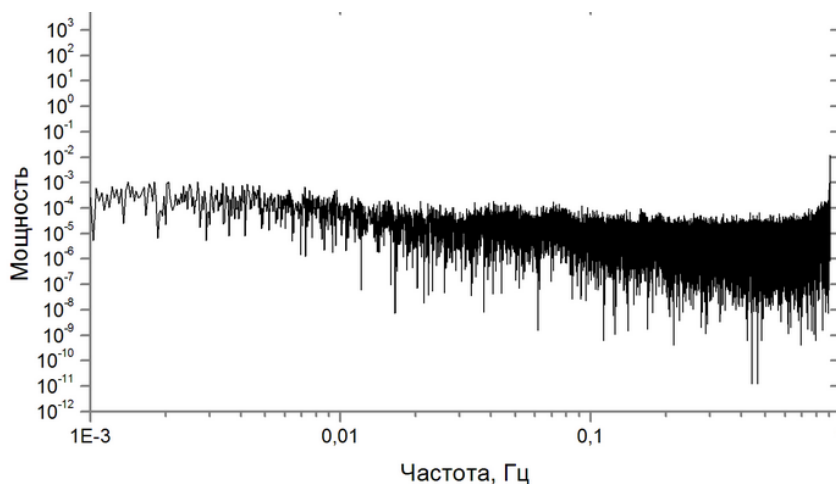


Рис. 8. График спектра мощности сигнала для канала темновых шумов внутреннего детектора.

Было найдено всего 7% коррелирующих пар каналов (коэффициент корреляции $> 0,5$), антикоррелирующих каналов найдено не было. После чего, данные были усреднены за период 1 час, и поиск корреляций был проведен для всех каналов (рис. 9). Поиск корреляций был произведен по 2 независимым наборам данных, полученным с разницей в месяц при неизменной конфигурации ФЭУ в каналах, при этом коррелирующие пары каналов совпадали менее чем в половине случаев. Таким образом, учитывая близость полученных значений степени корреляции каналов в частичной и полной выборках, можно сказать, что для поиска корреляций можно применять усреднение интенсивности темнового шума по времени. Малое число коррелирующих пар каналов, сравнимое с числом антикоррелирующих каналов, не являющееся к тому же постоянным от сессии к сессии, позволяет предположить, что корреляции носят случайный характер.

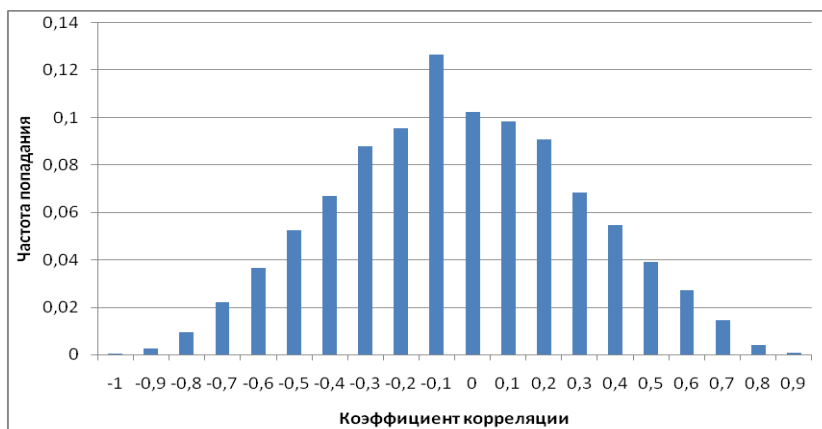


Рис. 9. Распределение коэффициентов корреляции для каналов внутреннего детектора.

Из всего множества макроскопических параметров, которые могут влиять на темновые шумы ФЭУ, наиболее существенным фактором является зависимость от температуры детектора. В детекторе происходит постоянный мониторинг температуры с периодом 1 час семью датчиками, расположенными на стенках резервуара с водой снаружи, и восьмью датчиками, расположенными внутри резервуара. Был рассмотрен график изменения температура в течение месяца внутри и снаружи детектора, после чего было проверено ее влияние на уровень темнового шума в течение рабочей сессии детектора.

В течение рассматриваемого периода в большинстве областей детектора наблюдалась тенденция к увеличению температуры, но при этом показания датчиков были относительно стабильны. Температура в разных областях детектора могла отличаться до 6 градусов. Температура снаружи детектора имела период колебаний, примерно равный суткам. Температура внутри детектора не имеет четкой периодической зависимости. Показания разных датчиков температуры снаружи детектора коррелируют между собой, для внутренних датчиков этого не наблюдается. Т.е. стальной бак, в котором находится детектор, является экраном, сглаживающим колебания температуры. Корреляций температуры детектора со значениями интенсивности темнового шума в пределах одной рабочей сессии детектора найдено не было.

Был рассмотрен характер изменения сигнала с ФЭУ для внутреннего детектора с течением времени. Данное исследование можно разделить на 2 части: исследование долговременных тенденций сигнала и исследование стабильности сигнала в течение сессии. Критерием стабильности работы детектора в течение рабочей сессии является выполнение следующих условий:

1. Подчинение спектра интенсивности сигнала в каналах и в детекторе нормальному распределению;
2. Стабильное среднее значение интенсивности темновых шумов во время сессии в каналах и в детекторе в целом;

3. Малая и стабильная дисперсия интенсивности сигнала в отдельных каналах и в детекторе в целом;
4. Малое число «шумящих» каналов – не более 10% от общего числа каналов;
5. Отсутствие влияния переходных процессов на работу ФЭУ в течение сессии.

Было рассмотрено распределение средней интенсивности в детекторе с учетом и без учета «шумящих». На графиках 10 и 11 показана аппроксимация средней интенсивности нормальным распределением с приведением доверительного интервала и интервала предсказания для вероятности 95%. Было высказано предположение, что при каком-либо событии, относящемся ко всему детектору, данное значение должно существенно изменяться. Примером такого события может быть попадание сильного светового потока в объём детектора или одновременное поднятие высокого напряжения, подаваемого на все или на большую группу ФЭУ.

Средняя интенсивность в детекторе подчиняется нормальному распределению, отношение стандартного отклонения к среднему значению не превышает 10%. При этом во многих каналах существуют отдельные значения, значительно отличающиеся от среднего. Также было отмечено, что при анализе данных на интервалах времени, характерных для одной сессии, наличие переходных процессов слабо влияет на статистику по темновым шумам, в основном из-за малых длительностей этих процессов. Статистические показатели для сигналов при отсутствии и наличии переходных процессов отличаются тем, что в последнем случае значительно увеличивается стандартное отклонение и коэффициент изменчивости. Таким образом, не было обнаружено каких-либо изменений статистических характеристик и формы сигнала в детекторе, влияющих на процесс детектирования нейтринных событий в детекторе в течение сессии.

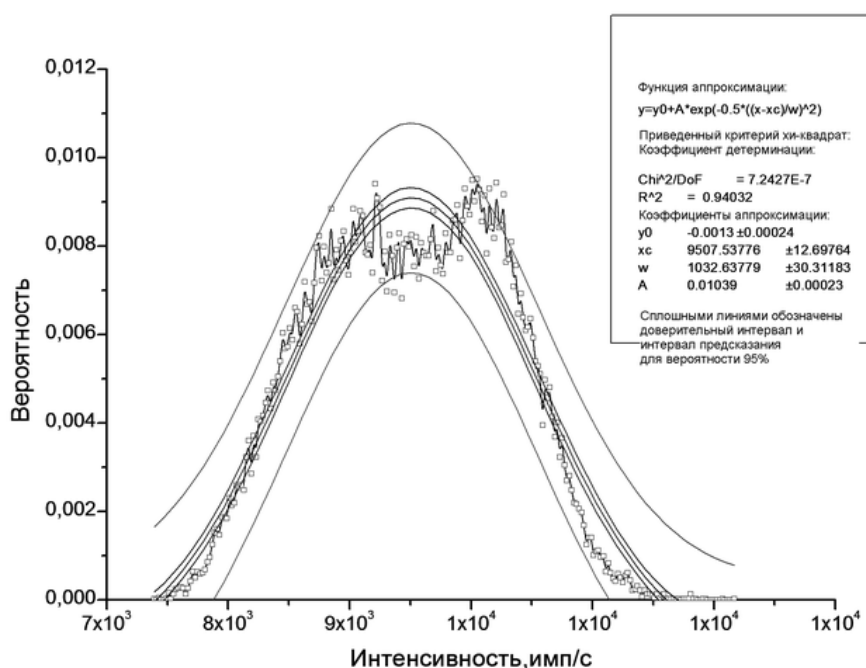


Рис. 10. Спектр усредненного по внутреннему детектору сигнала с ФЭУ.

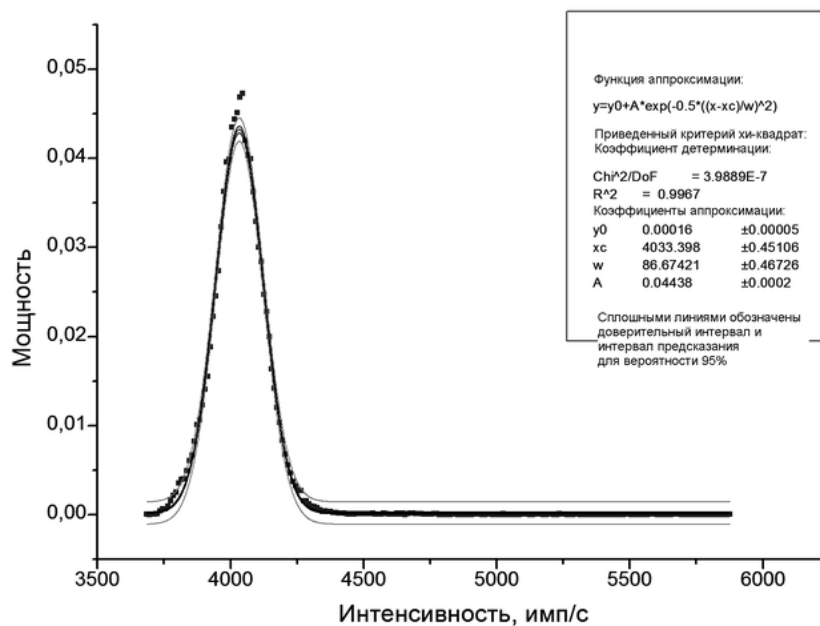


Рис. 11. Спектр усредненного по внутреннему детектору сигнала со всех ФЭУ за исключением "сильно шумящих".

Было рассмотрено поведение системы во время переходных процессов в детекторе:

- выключения и включения сигнала высокого напряжения, подаваемого на ФЭУ;
- фотографирования детектора с включением ламп подсветки, которое производится периодически (данные фотографии используются для наблюдения за формой внутренней нейлоновой сферы, отделяющей сцинтиллятор от остального объема детектора).

Целью исследования являлось выяснение степени влияния переходных процессов на величину и характер сигнала с ФЭУ, а также определение периода, в течение которого данное влияние ощутимо. В частности, важной задачей является определение временного интервала после окончания переходных процессов в детекторе, по истечении которого возможен сбор данных о нейтринных событиях.

Включение и выключение высокого напряжения ФЭУ оказывает слабое влияние на интенсивность шумов в детекторе (рис. 12). В течение первого получаса после включения высокого видно падение сигнала до стабильного уровня (величина падения составляет ~50%). Поэтому данные из этого интервала рекомендуется исключить из анализа при поиске нейтринных событий. Рассмотрение данных из различных каналов показало, что возбуждение повышенного уровня темновых шумов происходит только в некоторых ФЭУ, что приводит к повышению уровня шума в отдельных каналах (менее 50% от общего числа ФЭУ).

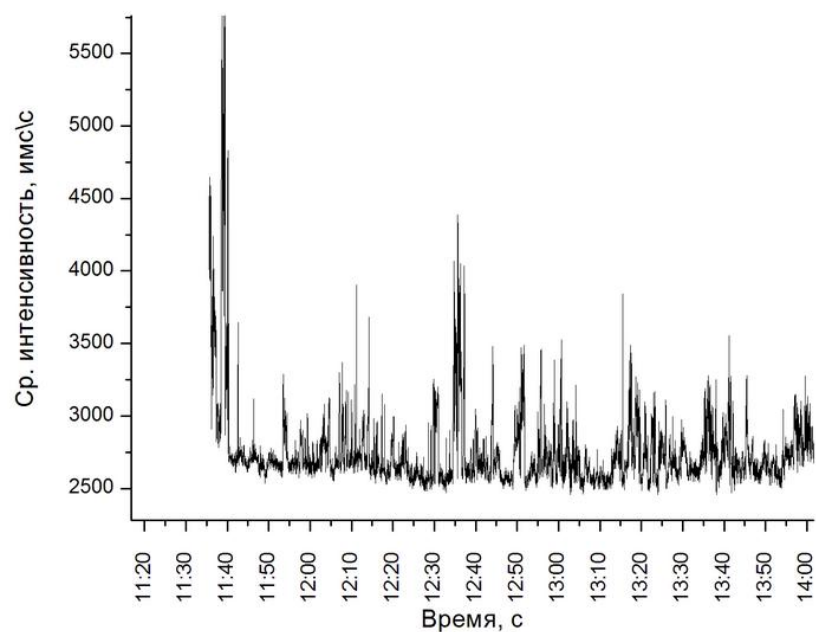


Рис.12. Изменение усредненного значения интенсивности в детекторе после выключения и включения напряжения на ФЭУ в течение первых 2-х часов.

Было рассмотрено влияние включения ламп подсветки при фотографировании внутреннего детектора на уровень интенсивности темнового шума ФЭУ усредненный по всему детектору (рис. 13).

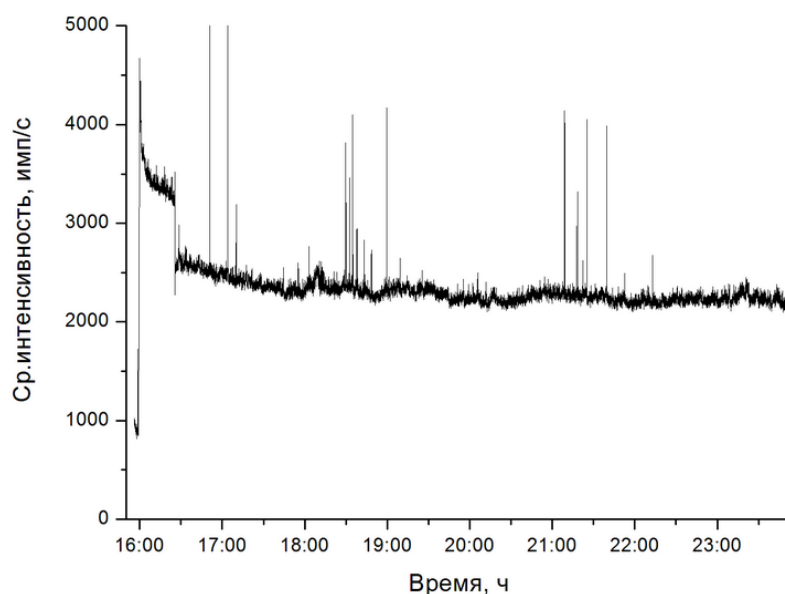


Рис.13. Изменение усредненного значения интенсивности темнового шума во внутреннем детекторе в результате воздействия света ламп подсветки.

В первые 30 минут после включения сбора данных с ФЭУ наблюдается повышенный средний уровень шума, который потом скачкообразно падает. Это происходит из-за того, что наиболее сильное возбуждение от ламп подсветки возникло в отдельных каналах, влияние которых на среднюю интенсивность в

детекторе велико. В каналах с нормальным уровнем шума наблюдается экспоненциальное падение сигнала в течение 15 часов (рис. 14).

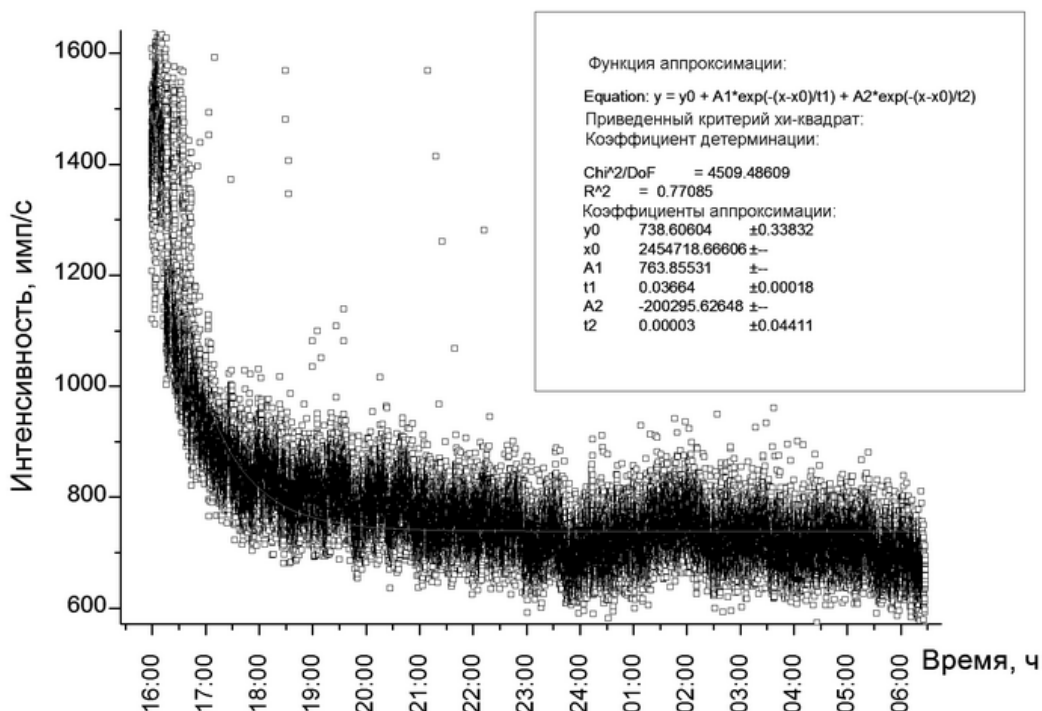


Рис.14. Изменение значения интенсивности темнового шума в одном из каналов во внутреннем детекторе в результате воздействия света ламп подсветки.

Исходя из собранной статистики по детектору в целом и по отдельным каналам, рекомендуется исключить из дальнейшей обработки данные по первым 8 часам с момента включения детектора после его фотографирования. За это время происходит падение интенсивности шумов в большинстве каналов до стабильного уровня. Нужно отметить, что основным фактором, потенциально влияющим на достоверность результатов, полученных в эксперименте, является именно нестабильность сигнала после использования ламп подсветки, а не его абсолютная величина.

Т.к. фотоаппараты и лампы подсветки расположены внутри стальной сферы (рис. 3), то данный процесс не влияет на ФЭУ внешнего детектора.

Основные результаты и выводы

Было разработано программное и аппаратное обеспечение для сбора, контроля и анализа данных о темновых шумах ФЭУ детектора солнечных нейтрино Борексино. Созданная система была внедрена в составе системы сбора данных детектора осенью 2004 года. С помощью данной системы осуществляется оперативный мониторинг состояния установки. Система будет основным способом контроля установки в течение всего планируемого времени сбора данных – примерно 10 лет.

Система контроля темновых шумов является хорошим инструментом для выявления ФЭУ с слишком высокой интенсивностью шумов, мешающих нормальному функционированию детектора. С помощью системы были выяснены и устранены причины высокого уровня шумов в некоторых ФЭУ при подготовке детектора Борексино к сбору данных.

С использованием системы сбора были накоплены информация о темновых шумах ФЭУ за последовательные промежутки времени. Данная информация была исследована на предмет корреляций между отдельными каналами ФЭУ и группами каналов, на наличие долгосрочных тенденций изменения сигнала. Также был определен спектр и другие характеристики сигнала, выявлена зависимость сигнала от физических параметров внешней среды.

При проведении анализа данных были получены следующие результаты. Спектр темнового шума ФЭУ в обычном режиме работы детектора подчиняется нормальному распределению. Интенсивность темнового шума не зависит от температуры снаружи детектора, не наблюдаются ни суточные, ни сезонные колебания. ФЭУ, функционирующие в нормальном режиме, не способны повлиять на частоту срабатывания триггера нейтринных событий. Между каналами темнового шума в детекторе не наблюдается явных корреляций. В течение переходных процессов в детекторе ФЭУ ведут себя одинаково: вначале наблюдается существенное увеличение темнового шума, после чего происходит его экспоненциальное падение до стабильного уровня. Данные процессы носят кратковременный характер и не способны повлиять на результаты поиска нейтринных событий в детекторе. Никаких постоянных долговременных тенденций изменения сигнала с ФЭУ, способных повлиять на детектирование нейтрино, обнаружено не было.

В течение работы детектора Борексино возможна модернизация системы сбора данных о темновых шумах для проведения исследований зависимости интенсивности темновых шумов ФЭУ от различных внешних и внутренних факторов. Например, возможно наблюдение и анализ изменений уровня сигнала в момент взрыва сверхновой.

Нужно отметить, что контроль и дальнейший анализ данных о темновых шумах детектора Борексина является обязательным условием достоверности наблюдаемых явлений и накапливаемых данных. Только в случае подтверждения отсутствия аномалий в сигналах ФЭУ в детекторе Борексина, допустимого уровня и формы спектра интенсивности темновых шумов, полученные данные о величине потока ${}^7\text{Be}$ -нейтрино можно использовать для доказательства гипотезы нейтринных осцилляций.

В заключение следует сказать, что важным результатом проведенной работы является создание работоспособной платформы, состоящей из аппаратных и программных модулей и описания взаимодействия между ними. Созданная платформа облегчает разработку систем контроля и анализа данных для ядернофизических установок различного размера и назначения, для которых требуется организовать сбор данных с большого числа датчиков.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

1. Д.И. Орехов, Д.И. Маймистов, А.С. Чепурнов. Система контроля темновых шумов фотоэлектронных умножителей детектора Борексино. // Тез. докл. конференции «Ломоносов-2005». Москва, Россия, Апрель 2005. Том 1, с. 34.
2. Д.И. Маймистов, Д.И. Орехов, А.С. Чепурнов. Комплекс интерактивного программного обеспечения для контроля данных, поступающих с детектирующих устройств. // Тез. докл. конференции «Ломоносов-2006». Москва, Россия, Апрель 2006. Том 1, с. 97.
3. Д.И. Орехов, А.С. Чепурнов, А.А. Сабельников, А.В. Этенко, Д.А. Маймистов. Система контроля темновых шумов ФЭУ для нейтринного детектора Borexino с применением протокола DeviceNet и доступом через web. // Препринт НИИЯФ МГУ. 2006-10/809.
4. A.S. Chepurnov, D.I. Orekhov, D.A. Maimistov, A.A. Sabelnikov, A.V. Etenko. PMT dark noise monitoring system for neutrino detector Borexino based on the DeviceNet protocol and web-access. // Problems of Atomic Science and Technology. Series «Nuclear Physics Investigations». 2006. №3. p. 131-133.
5. Д.И. Орехов, А.С. Чепурнов, А.А. Сабельников, Д.И. Маймистов. Распределенная система сбора и анализа данных на основе CAN-bus. // Приборы и техника эксперимента. 2007. №4. с. 65-72.
6. D.I. Orekhov, A.S. Chepurnov, A.A. Sabelnikov. Photomultipliers dark noise monitoring system for neutrino detector. // Proceedings of 57-th international conference «Nucleus-2007» «Fundamental problems of nuclear physics, atomic power engineering and nuclear technologies». Voronezh, Russia, June 2007. p. 301.
7. Д.И. Орехов, А.С. Чепурнов, А.А. Сабельников, А.В. Этенко. Система контроля темновых шумов фотоэлектронных умножителей для нейтринного детектора Borexino. // Вестник МГУ. 2008. Серия 3. Физика и астрономия. №3. с. 54-58.
8. Д.И. Орехов, А.С. Чепурнов, А.А. Сабельников. Промышленная система контроля и анализа данных на основе распределенных контроллеров, объединенных сетью CAN-bus. // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. 2008. №2(59). с. 126-131.

Подписано в печать: 21.01.2009

Заказ № 1477 Тираж – 100 экз.

Печать трафаретная.

Типография «11-й ФОРМАТ»

ИНН 7726330900

115230, Москва, Варшавское ш., 36

(499) 788-78-56

www.autoreferat.ru

