

На правах рукописи

Воронин Дмитрий Михайлович

**Разработка и создание калибровочных систем
для экспериментов в астрофизике частиц**

1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН).

Научный руководитель:

Лубсандоржиев Баярто Константинович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, отдел экспериментальной физики, ведущий научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Барабаш Александр Степанович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Курчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики, начальник лаборатории слабых взаимодействий.

Болоздыня Александр Иванович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Институт ядерной физики и технологий, межкафедральная лаборатория экспериментальной ядерной физики, заведующий научно-исследовательской лабораторией.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова Российской академии наук (г. Москва, г. Троицк).

Защита состоится _____ г. в _____ часов на заседании диссертационного совета 24.1.163.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИЯИ РАН по адресу: <https://www.inr.ru>

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.163.01,
кандидат физико-математических наук

Демидов С.В.

Общая характеристика работы

Актуальность и степень проработанности темы. В физических экспериментах, в экспериментах в физике высоких энергий и астрофизике частиц (нейтринной физике, физике космических лучей и наземной гамма-астрономии высоких энергий в особенности) активно применяются детекторы фотонов и среды, в которых рождаются и распространяются фотоны. Детекторы фотонов регистрируют фотоны, рожденные в этих средах. В случае черенковских детекторов — это прозрачные среды, используемые в качестве мишени. В черенковских нейтринных телескопах — это прозрачная вода озер (озеро Байкал), морей (ANTARES, KM3NET) и океанов (проекты TRIDENT, P-ONE), большие толщи льда (IceCUBE на Южном Полюсе). Регистрация нейтрино производится путем детектирования фотонов черенковского излучения, вызванных прохождением продуктов взаимодействия нейтрино в воде или во льду, детекторами фотонов (оптическими модулями). В сцинтилляционных нейтринных телескопах нейтрино регистрируются детектированием сцинтилляционного излучения детекторами фотонов.

Эксперименты по исследованию космических лучей высоких и ультравысоких энергий и наземной гамма-астрономии — это, как правило, сложные, комплексные эксперименты, включающие в себя черенковские, флуоресцентные и сцинтилляционные установки. Черенковские и флуоресцентные установки регистрируют черенковское и флуоресцентное излучения, произведенные широкими атмосферными ливнями (ШАЛ) в атмосфере Земли, детекторами фотонов. Сцинтилляционные установки детектируют электромагнитную, мюонную и адронную компоненты ШАЛ. В сцинтилляторах поглощенная в них энергия частиц преобразуется в световое (сцинтилляционное) излучение, которое регистрируется также детекторами фотонов.

Детекторы фотонов — это, в основном, вакуумные и твердотельные фотоэлектронные умножители (далее фотоумножители или ФЭУ). В редких уже случаях используются фотодиоды и лавинные диоды.

Для надежной и стабильной работы черенковских, флуоресцентных и сцинтилляционных детекторов необходимо контролировать параметры как детекторов фотонов (вакуумных и твердотельных), так и детектирующих сред (воды, атмосферы, сцинтилляторов жидких и твердотельных, и т.д.). Необходимо контролировать основные параметры детекторов фотонов – чувствительность (эффективность регистрации фотонов), коэффициент усиления, временное разрешение, скорость счета импульсов темнового тока. Для детектирующих сред к контролируемым параметрам относятся прозрачность среды (длина ослабления светового потока), световыход (эффективность преобразования поглощенной энергии частиц в фотоны) в случае сцинтилляционных детекторов, временное разрешение установок. Также для сцинтилляционных детекторов применяются радиоактивные источники.

Таким образом, необходимо создание калибровочных систем, призванных именно контролировать основные параметры экспериментов. Одним из основных элементов фотонных калибровочных систем являются источники света – постоянные и импульсные.

В данной работе основной акцент сделан на импульсных быстродействующих источниках световых импульсов, но без внимания не осталось применение и радиоактивных источников, активно используемых в сцинтилляционных экспериментах.

В фотонных калибровочных системах используются различные типы источников света. В начальный период развития экспериментов с черенковскими и сцинтилляционными детекторами довольно широко использовались источники света на основе электрических разрядников [1–3]. Использовались разрядные источники с длительностью импульса ~ 1 нс и даже меньше. Хотя с такими источниками можно достичь значительных амплитуд световых импульсов, есть большие сложности с обеспечением стабильности излучения как временной, так и амплитудной. Для улучшения стабильности применялись электрические разряды в ртути (ртутные разрядники) и в инертных газах, чаще всего в азоте. К тому же с разрядными источниками есть еще одна проблема, связанная со сложностями регулирования амплитуды светового сигнала и синхронизации световых импульсов источника. Все эти перечисленные сложности существенно ограничивают их применение в экспериментах.

Отдельного упоминания заслуживает уникальный источник света, который активно развивался и использовался в калибровочной системе эксперимента SNO [4, 5], работающий по методу однопузырьковой сонолюминесценции [6]. При определенных условиях устанавливаются устойчивые колебания объема, осцилляции, пузырька. При сжатии пузырька происходит явление, называемое сонолюминесценцией. При этом рождается достаточное количество фотонов, чтобы засветить весь детектор, все фотоумножители (9438 штук) эксперимента SNO. Спектр излучения хорошо согласовывается с чувствительностью фотоумножителей эксперимента. Длительность световых импульсов не превышает 100 пс, в импульсе может быть от 10^4 до 10^7 фотонов.

Еще один широко применяемый тип источника света — лазеры (лазерные системы). В настоящее время существует большое разнообразие лазеров, подходящих для калибровочных систем, и по длительности импульсов, и длине волны излучения, и по мощности излучения. Несмотря на отличные параметры, лазеры остаются достаточно сложными системами для эксплуатации в условиях эксперимента. Также немаловажным фактором является их высокая стоимость.

В нейтринном телескопе НТ-200 на озере Байкал использовался азотный N_2 -лазер в сочетании с лазером на красителях для смещения длины излучения на длину 470 нм. Для управления амплитудой импульса применялся нейтральный, оптический аттенюатор в виде диска с перестраиваемым коэффициентом поглощения света. Изменение поглощения света осуществлялось механически.

Создание ультраярких синих светоизлучающих диодов (светодиодов) в начале 1990-х годов открыло прекрасные возможности для разработок эффективных, надежных и недорогих калибровочных систем на основе таких светодиодов в лабораторных условиях. Применение быстродействующих светодиодных драйверов и соответствующих им светодиодов позволяет добиться длительности световых импульсов ~ 2 нс, для лучших экземпляров светодиодов это значение даже < 1 нс. В отличие от разрядных систем, для светодиодных систем возможна плавная регулировка амплитуды светового импульса. Для светодиодов высокой мощности и высоковольтных светодиодных драйверов количество фотонов в импульсе достигает значений до 10^{12} с длительностью импульса 2–3 нс.

Целью работы является создание калибровочных систем для черенковских и сцинтилляционных установок экспериментов по исследованию физики космических лучей и наземной гамма-астрономии TAIGA, многоцелевого нейтринного эксперимента JUNO, прототипов Баксанского большого нейтринного телескопа (ББНТ) и эксперимента по поиску аксионов BabyIAXO.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Разработать и создать калибровочную систему на основе высоковольтного светодиодного драйвера и светодиода высокой мощности для применения на беспилотном летательном аппарате;
2. Провести испытания высоковольтного светодиодного блока на установке TAIGA-HiSCORE;
3. Разработать и создать калибровочную систему для эксперимента JUNO для массового тестирования системы SPMT на основе быстродействующего драйвера на комплементарной паре транзисторов BFR92 и BFT92 с применением оптоволоконного разветвителя;
4. Разработать и создать программное обеспечение для плат управления светодиодными драйверами;
5. Разработать и создать калибровочную систему для прототипов Баксанского большого нейтринного телескопа с использованием диффузно-рассеивающей сферы, а также калибровочную систему с применением радиоактивных источников;
6. Разработать детектор мюонного вето и его калибровочную систему для эксперимента BabyIAXO.

Научная новизна и практическая значимость: впервые в мире разработана, создана и успешно испытана в натуральных условиях калибровочная система с использованием наносекундных светодиодов высокой мощности на борту беспилотных летательных аппаратов для временной калибровки широкоугольных черенковских детекторов широких атмосферных ливней.

Впервые использованы ультрафиолетовые светодиоды высокой мощности в калибровочных системах.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты разработки и создания быстродействующих источников света на основе сверхъярких и большой мощности светодиодов для калибровочных систем черенковских и сцинтилляционных экспериментов в астрофизике частиц.
2. Результаты разработки и создания светодиодной калибровочной системы для отбора, тестирования и исследования параметров 3-х дюймовых фотоумножителей эксперимента JUNO.
3. Результаты разработки и создания светодиодной калибровочной системы и калибровочной системы с использованием радиоактивных источников для прототипов Баксанского большого нейтринного телескопа.
4. Результаты разработки и создания калибровочной системы черенковских и сцинтилляционных установок эксперимента Тунка/TAIGA.
5. Результаты разработки и создания вето-детектора и калибровочной системы этого детектора для эксперимента по поиску аксионов BabyIAXO.

Достоверность полученных результатов подтверждается успешной эксплуатацией разработанных калибровочных систем в экспериментах TAIGA и ББНТ, в массовом тестировании фотоумножителей эксперимента JUNO, в тестовых измерениях вето-детектора эксперимента BabyIAXO.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались автором на международных и российских конференциях:

1. 36 Международная конференция по космическим лучам ICRC 2019, Мэдисон, США, 24 июля – 1 августа 2019;
2. 27 Международная конференция Ломоносов 2020, Москва, Россия, 10 – 27 ноября 2020 г.;
3. 28 Международная конференция Ломоносов 2021, Москва, Россия, 11 – 23 апреля 2021 г.;
4. 37 Международная конференция ICRC 2021, Берлин, Германия, 12 – 23 июля 2021 г.;
5. 64 Всероссийская конференция МФТИ, Москва, Россия, 29 ноября – 3 декабря 2021 г.;
6. 37 Всероссийская конференция по космическим лучам, Москва, Россия, 27 июня – 2 июля 2022.

Личный вклад. Вклад автора был определяющим в разработках и создании всех элементов калибровочных систем, представленных в диссертационной работе. Лично автором разработаны и созданы наносекундные источники света (формирователи запуска, источники питания, электронные платы управления и т.д.), бортовая электронная система беспилотных летательных аппаратов, системы оптоволоконных кабелей.

Публикации. Основные положения, выносимые на защиту, опубликованы в 10 [A1-A10] работах, индексируемых в международных базах данных Web of Science, SCOPUS, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка использованной литературы. В заключении приводятся основные выводы диссертационной работы. Объём диссертации составляет 132 страницы, диссертация содержит 108 рисунков, 1 таблицу и 153 наименования цитируемой литературы.

Содержание работы

Во **введении** дается обоснование актуальности исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы. Приводятся примеры применения калибровочных систем для экспериментов в астрофизике частиц, формулируются цели и задачи, а также практическая значимость и новизна выполненной работы.

Первая глава посвящена описанию светодиодных систем, разработанных для калибровочных измерений черенковских установок эксперимента TAIGA. Эксперимент TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma Astronomy) [7] — комплексный эксперимент по исследованиям в области физики космических лучей и наземной гамма-астрономии высоких энергий. Эксперимент расположен на территории Тункинского национального парка в Тункинской долине в Республике Бурятия в 50 км западнее самой юго-западной точки озера Байкал. Высота над уровнем моря составляет 675 м. В состав эксперимента входят широкоугольные черенковские установки Tunka-133 и TAIGA-HiSCORE, сцинтилляционные установки Tunka-Grande и TAIGA-Muon, сеть узкоугольных

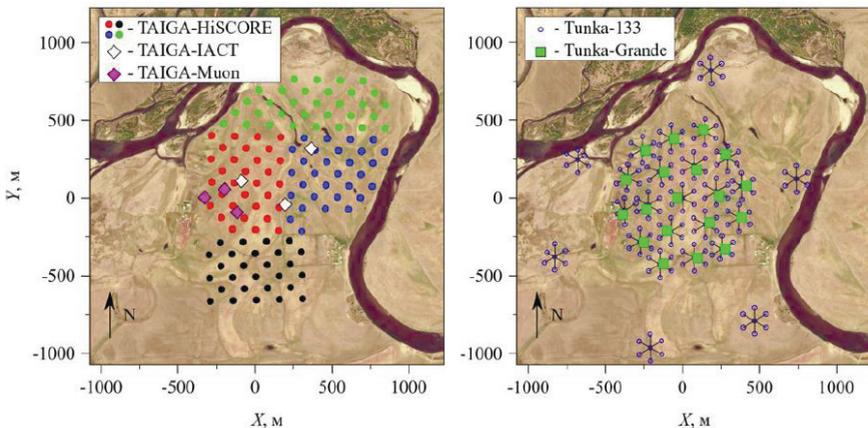


Рис. 1. Расположение установок эксперимента TAIGA – TAIGA-HiSCORE, Tunka-133, TAIGA-IACT, Tunka-GRANDE и TAIGA-Muon

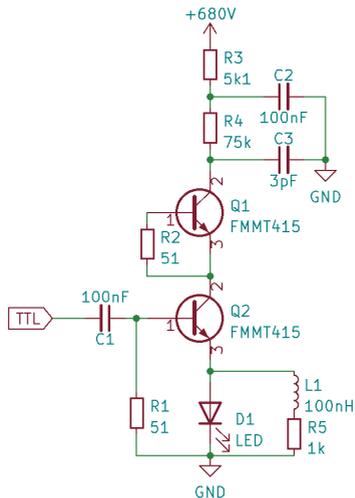


Рис. 2. Принципиальная схема высоковольтного светодиодного драйвера

атмосферных черенковских телескопов изображения TAIGA-IACT и установка по радиодетектированию широких атмосферных ливней Tunka-REX. Схема расположения черенковских и сцинтилляционных установок эксперимента TAIGA представлена на рисунке 1.

Для калибровочных измерений широкоугольных черенковских установок TAIGA-HiSCORE и Tunka-133 разработаны и созданы наносекундные источники света на базе синих ультраярких светодио-

дов и светодиодов высокой мощности на основе соединений InGaN/GaN с формирователями импульсов запуска на лавинных транзисторах. Принципиальная схема такого источника света показана на рисунке 2. При использовании лавинных транзисторов FMMT415 в этих источниках света удастся достичь амплитуды светового импульса $\sim 10^{10}$ фотонов в импульсе при длительности ≤ 1 нс (FWHM) при использовании ультраярких светодиодов, в случае светодиодов высокой мощности параметры световых выходов и кинетики свечения составляют $\sim 10^{12}$ фотонов в импульсе и ~ 2.5 нс (FWHM) соответственно.

С использованием разработанных наносекундных источников были проведены калибровочные измерения черенковской установки TAIGA-HiSCORE. В этих измерениях источник света располагался на расстоянии ~ 100 м от периметра группы из 9 оптических станций установки TAIGA-HiSCORE (HiSCORE-9). Для засветки оптических станций на каждой станции устанавливались отражатели света. Были измерены систематические временные сдвиги для каждой оптической станции. Временное разрешение оптической станции TAIGA-HiSCORE составило в этих измерениях — $\sigma(t) \sim 0.39$ нс.

Для калибровочных измерений всей широкоугольной установки в целом была предложена идея использования описанных источников света на борту беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В качестве носителя калибровочного источника света рассматриваются варианты применения как промышленных/коммерческих (например, гексакоптеров), так и беспилотных летательных аппаратов, доступных для самостоятельной сборки. В данной работе описывается применение квадрокоптера с возможностями, достаточными для выполнения калибровочных измерений широкоугольных черенковских установок.

Для проведения калибровочных измерений с помощью беспилотного летательного аппарата был разработан высоковольтный светодиодный модуль, рисунок 3. Светодиодный источник света размещен в компактном и лёгком корпусе, позволяющий использовать его даже на относительно малоразмерных летательных аппаратах, например, для рам типоразмера 5 дюймов. На рисунке 3 показано расположение внутренних компонентов высоковольтного светодиодного модуля. На печатной плате чёрного цвета располагается схема высоковольтного светодиодного драйвера с установленным светодиодом

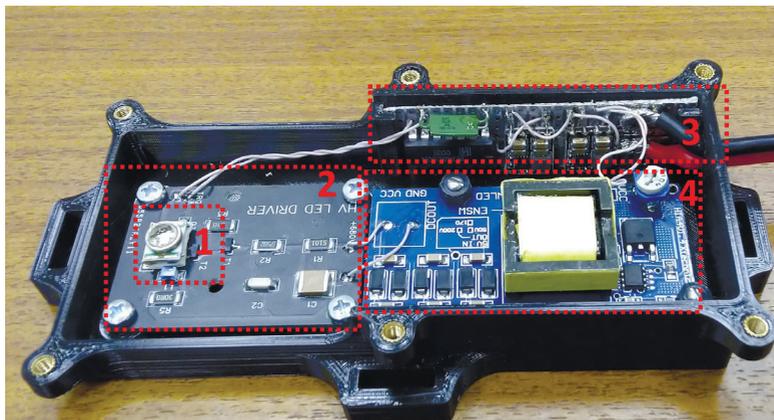


Рис. 3. Высоковольтный светодиодный модуль.

1 — светодиод высокой мощности, 2 — печатная плата высоковольтного светодиодного драйвера, 3 — макетная плата, на которую поступает питание от батареи летательного аппарата, также здесь находятся генератор запускающих импульсов для драйвера и два понижающих преобразователя напряжения, 4 — повышающий преобразователь напряжения



Рис. 4. Высоковольтный светодиодный источник света, квадрокоптеры 7 и 5 дюймов, слева направо

высокой мощности. Печатная плата синего цвета – повышающий DC-DC преобразователь, на выходе которого формируется напряжение 680 В для питания драйвера. На третьей плате размещены генератор запускающих импульсов и два понижающих DC-DC преобразователя МАТЕК MICRO ВЕС (6-30V TO 5V/9V-ADJ). Подключение к питанию осуществляется через разъём XT60, выведенный наружу корпуса.

Была осуществлена самостоятельная сборка квадрокоптеров двух типоразмеров: 5 и 7 дюймов. На рисунке 4 показаны высоковольтный светодиодный источник света, 7- и 5-дюймовые квадрокоптеры. В качестве готового решения применялся гексакоптер Matrice 600 Pro фирмы DJI, для которого проводились измерения по определению точности получаемых координат нахождения летательного аппарата в воздухе и осуществлялись калибровочные измерения по определению временных задержек между станциями установки TAIGA-HiSCORE.

Для проведения временной калибровки с использованием БПЛА была подготовлена программа для автономного полёта: 9 точек на высоте 500 м от точки взлёта, в каждой точке аппарат должен был находиться 1 мин. Частота запускающего генератора составляла 30 Гц. Когда гексакоптер находился в одной из 9 точек, он засвечивал определённую группу станций. В каждой группе станций выбиралась «базовая», относительно которой проводились измерения задержек в группе. Одним из критериев выбора базовой станции является то, чтобы она была также засвечена в предыдущей группе станций. Это необходимо в дальнейшем при обработке данных, чтобы объединить результаты по всем группам засвечиваемых станций.

Далее для каждой группы станций выбираются события в одном временном окне, по которым определяется задержка между событиями относительно базовой станции. Одновременно с этим вычисляется теоретическая задержка между станциями в группе, учитывая распространение света в воздухе, зная координаты БПЛА с установленным источником света и засвечиваемых станций. Вычитая между собой теоретические и практические задержки в зарегистрированных событиях, получаем искомые временные поправки, необходимые для восстановления событий.

В результате проведения временной калибровки установки TAIGA-HiSCORE с помощью БПЛА были вычислены временные поправки и получено временное разрешение установки ~ 0.29 нс (σ).

Для отбора, тестирования и исследования параметров фотоумножителей камер изображения сети узкоугольных телескопов TAIGA-IACST использовался светодиодный источник с быстродействующим драйвером на комплементарной паре транзисторов BFT92 и BFR92. В первых трех телескопах используются фотоумножители XP1911B.

Исследования параметров данных фотоумножителей показывают, что однофотоэлектронное разрешение составляет $\sim 75\%$ (FWHM), а отношение пик/долина зарядового спектра однофотоэлектронных импульсов – $P/V \sim 3$. Скорость счета импульсов темнового тока при уровне дискриминации сигнала 0.25 фотоэлектрона не превышает 2 кГц при температуре 23°C. Разброс времени пролета фотоэлектронов составляет 1.9 нс (FWHM). Вероятность появления послеимпульсов не превышает 2% на фотоэлектрон. Параметры фотоумножителя XP1911В отвечают, в целом, требованиям, предъявляемым к фотоумножителям для использования в составе камер атмосферных черенковских телескопов изображения TAIGA-IACT. Результаты главы опубликованы в работах [A1; A2].

Во **второй главе** описывается калибровочная система на базе быстродействующих светодиодных источников света и пластиковых оптоволоконных кабелей, разработанных и созданных для массового тестирования малогабаритных фотоумножителей эксперимента JUNO.

Эксперимент JUNO (Jiangmen Underground Neutrino Observatory) [8] — многоцелевой нейтринный эксперимент, одной из основных задач которого является определение иерархии масс нейтрино, используя подземный крупномасштабный жидко-сцинтилляционный детектор массой 20 кт. Детектор находится на равном удалении ~ 53 км от двух АЭС (Тайшань и Янцзян) с общей мощностью 26.6 ГВт, расположенных на побережье Южно-Китайского моря на юго-востоке Китая.

Для достижения поставленных физических целей в эксперименте необходимо иметь энергетическое разрешение не хуже 3% на 1 МэВ. Для этого в эксперименте 20 кт жидкого сцинтиллятора на основе линейного алкилбензола просматриваются 17612 фотоумножителями с фотокатодами диаметром 20 дюймов, составляющими систему LPMT, и 25600 фотоумножителей с фотокатодами диаметром 3 дюйма, образующими систему SPMT. Фотоумножители системы SPMT устанавливаются между фотоумножителями системы LPMT, рисунок 5.

Для системы SPMT в компании HZC Photonics был разработан фотоумножитель XP72B22. На рисунке 6а и 6б показаны эскиз



Рис. 5. Фотография крупно- и малогабаритных фотоумножителей в эксперименте JUNO

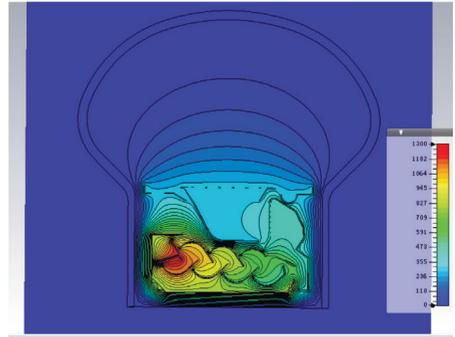
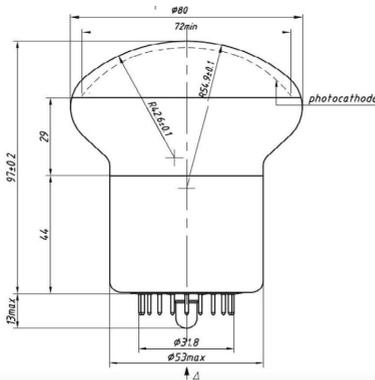


Рис. 6. Фотоумножитель XR72B22: а) эскиз фотоумножителя XR72B22 (размеры в мм); б) электронная оптика фотоумножителя XR72B22 [9]

стеклооболочки и электронная оптика фотоумножителя, соответственно. Как видно из рисунка 6б, для получения более компактной формы в фотоумножителе применено расположение динодной системы в виде “сапожка”. Массовое производство этих фотоумножителей началось в январе 2018 года и закончилось в декабре 2019 г.

В процессе производства фотоумножителей XP72B22 непрерывно велась работа по отбору, тестированию и контролю за параметрами фотоумножителей. Исходя из условий эксперимента, были сформулированы требования к параметрам фотоумножителей. Контроль осуществлялся по 15-и основным параметрам-требованиям [9].

Среди основных требований следует выделить: квантовую эффективность фотокатода (QE) на длине волны 420 нм — не менее 22%; величину высоковольтного напряжения питания, соответствующую усилению 3×10^6 — не менее 900В, не более 1300В; разрешение зарядового спектра однофотоэлектронных импульсов — не более 45%; отношение пик/долина зарядового спектра однофотоэлектронных импульсов — не менее 2; скорость счёта импульсов темнового тока при уровне дискриминации сигналов, соответствующем 0.25 фэ — не более $1,8 \times 10^3 \text{ с}^{-1}$; скорость счёта импульсов темнового тока при уровне дискриминации сигналов, соответствующем 3.0 фэ — не более 30 с^{-1} ; разброс времени пролета фотоэлектронов при однофотоэлектронной засветке фотокатода — не более 2.1 нс (σ); уровень послеимпульсов — не более 15%.

Для массового тестирования этих фотоумножителей XP72B22 была разработана и создана калибровочная система, включающая в себя выполненный в стандарте NIM светодиодный блок и оптоволоконную систему. Оптоволоконная система состоит из оптического разветвителя и пластиковых оптоволоконных кабелей. Данная калибровочная система позволяет одновременно исследовать параметры сразу 16 фотоумножителей XP72B22 от одного источника света.

Принципиальная схема светодиодного блока представлена на рисунке 7. Блок включает в себя формирователь сигнала логического уровня TTL, преобразователь сигналов TTL-NIM и быстродействующий светодиодный драйвер на базе транзисторов VFR92 и VFT92. Сам светодиодный драйвер показан в самой нижней части рисунка 7. Сформированный TTL-сигнал поступает на преобразователь TTL-NIM и светодиодный драйвер. Преобразователь TTL-NIM служит для выработки синхросигнала с логическим уровнем стандарта NIM. Все необходимые напряжения питания поступают от источника питания крейта NIM по шинам магистрали.

Конструкцию оптоволоконной системы можно разделить на три части: первая часть, идущая от светодиодного блока с одним оптово-

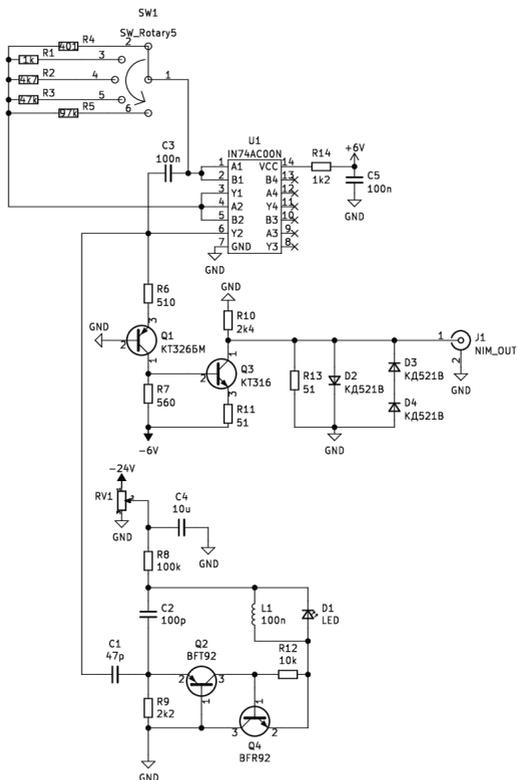


Рис. 7. Принципиальная электрическая схема светодиодного блока в стандарте NIM

локном; вторая часть из 17 оптических волокон (16 основных + 1 контрольное); между этими частями располагается цилиндрический диффузный рассеиватель света толщиной 5 мм и диаметром 16 мм.

Данная калибровочная система была разработана, изготовлена в двух идентичных экземплярах и использована в массовом тестировании 3-дюймовых фотоумножителей для системы SPMT эксперимента JUNO в Гуанси (Китай) и Тайбэе (Тайвань).

Всего протестировано в общей сложности более 26 тысяч фотоумножителей XR72B22. По результатам этого массового тестирования [9] по всем параметрам-требованиям было отсеяно только 15 образцов фотоумножителей. Результаты главы опубликованы в работах [A4] и [A5].

В третьей главе приводится описание полутонного прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа (ББНТ) с результатами проведённых калибровочных измерений как со светодиодной системой, так и при помощи системы с радиоактивными источниками.

Детектор расположен в основном экспериментальном зале подземной части лаборатории ГГНТ (галлий-германиевого нейтринного телескопа) БНО ИЯИ РАН, Россия. Экспериментальный зал находится в толще горы Андырчи (3937 м), над залом толщина горной породы составляет 2.14 км, что соответствует вертикальной глубине 5580 м.в.э. ($\rho_{\text{ср}} = 2.7 \pm 0.01 \text{ г/см}^3$). С учётом топографии местности интегральная глубина составляет 4500 м.в.э. [10]. В 10^7 раз поток мюонов космических лучей ниже в зале ГГНТ, чем на поверхности. Расположение подземной лаборатории ГГНТ предоставляет прекрасную возможность для создания крупномасштабного жидко-сцинтилляционного нейтринного телескопа. Удаленность от



Рис. 8. Модель полутонного прототипа ББНТ

ядерных реакторов и значительная глубина залегания лаборатории ГГНТ действительно являются несомненным достоинством расположения лаборатории.

Проект создания ББНТ выполняется в несколько этапов [11]. На первом этапе проекта был разработан и создан полутонный прототип ББНТ. Полутонный прототип, рисунок 8, состоит из ~500 кг жидкого сцинтиллятора на основе линейного алкилбензола в акриловой сфере с внешним диаметром 1 м и толщиной стенки 2 см. Сфера окружена металлическим каркасом с закрепленными на ней фотоумножителями. Всё это помещается в армированный стальным каркасом цилиндрический бак объёмом 11.5 м³ из сополимерного полипропилена (ПП-С), заполненной ультрачистой водой.

В полутонном прототипе используются 10-дюймовые фотоумножители НАМАМАТСУ R7081-100 WA-S70. Делитель находится под слоем гидроизоляции, из которого выходит только один коаксиальный кабель. Этот кабель одновременно служит для передачи анодного сигнала и напряжения питания фотоумножителя.

Полутонный прототип — двухзонный детектор: акриловая сфера с жидким сцинтиллятором, окруженная сверхчистой водой. Для проведения калибровочных измерений прототипов ББНТ разработан и создана калибровочная система, состоящая из светодиодного наносекундного источника света, оптоволоконных кабелей и диффузного рассеивателя света.

Для возможности удалённого изменения параметров светодиодного блока была разработана плата управления быстродействующим светодиодным драйвером. В качестве основы была выбрана платформа ARDUINO NANO с установленным 8-битным микроконтроллером (МК) ATmega328p. Этот микроконтроллер имеет два 16-битных и один 8-битный таймеры. С помощью 16-битных таймеров осуществляется точная регулировка напряжения питания и генерация TTL-сигнала, необходимого для работы светодиодного драйвера. 8-битный таймер используется для системных нужд МК.

В данной плате управления, в виду ограниченных аппаратных ресурсов платформы, возможно работа только с одним быстродействующим светодиодным драйвером. Схема регулировки напряжения построена на операционном усилителе LM358 и составном транзисторе КТ8106А.

Возможности разработанного светодиодного блока:

- 1) управления как с лицевой панели устройства, так и через подключение к персональному компьютеру (ПК);
- 2) вывод на лицевую панель текущего статуса устройства (значение установленного напряжения, частоты генерации TTL сигнала, индикация режима управления (либо с лицевой панели устройства, либо от ПК), при управлении от ПК блокируется возможность изменять параметры напряжения и частоты с лицевой панели).

Следующим шагом в разработке управляемых от ПК светодиодных блоков было создание платы управления, рассчитанной на работу с двумя светодиодными драйверами. Новая плата была построена на МК Cypress CY8C4245AXI-483. Для регулировки напряжения на драйвере использовался ЦАП MCP4725, также был применён изолятор для гальванической развязки USB-разъёма. Диапазон регулируемого напряжения на светодиодном драйвере составляет от 2 В до 20 В, а частота генерации запускающих импульсов настраивается в диапазоне от 2 Гц до 20 кГц. Устройство также имеет возможность и ручного управления, и через подключение к ПК. На передней панели имеются выходы для синхронизации с логическими уровнями TTL и NIM.

Дальнейшим развитием идеи многоканальной удалённо управляемой калибровочной системы стало создание системы, рассчитанной на четыре светодиодных драйвера. Новая плата управления была построена на МК STM32F401CCU6. В текущей версии платы на МК STM32F401CCU6 используются 5 аппаратных таймеров: по одному на каждый драйвер для настройки напряжения, 1 для генератора TTL-сигнала. Все четыре светодиодных драйвера синхронизированы между собой. Условно на плате управления можно выделить четыре канала, каждый включает в себя повышающий DC-DC преобразователь и схему регулировки напряжения. Таким образом, регулировка напряжения на светодиодных драйверах осуществляется независимо друг от друга.

На рисунке 9 приведены фотографии разработанного 4-канального светодиодного блока. Быстродействующий светодиодный драйвер на комплементарной паре транзисторов BFR92 и BFT92 используется как в полностью ручном режиме, так и под управлени-

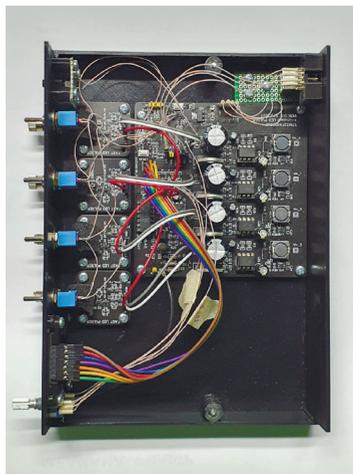


Рис. 9. 4-канальный светодиодный блок на базе МК STM32F401CCU6:
а) вид спереди со стороны органов управления; б) вид сверху

ем плат на основе ARDUINO NANO, МК Cypress CY8C4245AXI-483, МК STM32F401CCU6.

Для проведения энергетической калибровки полутонного прототипа ББНТ разработана и создана калибровочная система на основе контейнера для размещения радиоактивных источников. Контейнер, изготовленный из акрила, при сборке становится полностью герметичным.

С помощью описанной системы были измерены энергетические отклики полутонного прототипа ББНТ для гамма-квантов различных энергий от радиоактивных источников (ОСГИ): ^{109}Cd , ^{22}Na , ^{133}Ba , ^{137}Cs и ^{60}Co . Контейнер с радиоактивными источниками закрепляется на циркониевой трубке с фланцем и погружается в центр жидкого сцинтиллятора детектора. В калибровочных измерениях с данной системой получена зависимость световыхода детектора от энергии гамма-квантов.

Результаты главы опубликованы в работах [А3] и [А6-А8].

Четвертая глава посвящена разработке и созданию детектора мюонного вето эксперимента по поиску аксионов BabyIAXO.

Аксионная Обсерватория (International Axion Observatory –

IAXO) [13] — проект эксперимента с чувствительностью, превышающей на 5 порядков чувствительность эксперимента CAST, активно разрабатывается в настоящее время коллаборацией из 25 институтов из 10 стран. Как промежуточный экспериментальный этап эксперимента IAXO разрабатывается в настоящее время проект BabyIAXO [14].

Установка BabyIAXO разрабатывается как прототип эксперимента IAXO, на котором будут отрабатываться все компоненты (детекторы, оптические системы, магниты, криогенные системы и т.д.) полномасштабного эксперимента IAXO. Тем не менее, BabyIAXO планируется, как и вполне самодостаточный эксперимент, который будет работать в ранее неисследованной области параметров $g_{\alpha\gamma}$ до $\sim 1.5 \times 10^{-11} \text{ ГэВ}^{-1}$ и масс аксионов до 0.25 эВ, захватывая область КХД-аксионов [12, 13]. Установка BabyIAXO будет располагаться в экспериментальном комплексе DESY в Гамбурге. Для достижения требуемого уровня фона ($\sim 10^{-8} \text{ кэВ}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, а в перспективе и $10^{-9} \text{ кэВ}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$) установка должна быть снабжена как пассивной защитой, так и активной системой мюонного вето. Таким образом, разработка и создание эффективной системы мюонного вето является одним из ключевых моментов для успеха эксперимента IAXO.

Основой детекторной системы эксперимента BabyIAXO будет небольшая по размеру время-проекционная камера TPC (Time Projection Chamber) с выводом на Miromegas (MICRO-MEsh Gaseous Structure) структуру на аноде, а катод TPC направлен на канал магнита, где аксионы конвертируются в рентгеновские фотоны. Детекторная система установки BabyIAXO плотно обложена пассивной защитой из свинца. Пассивная защита должна быть окружена активной вето системой со всех сторон.

Для эффективного подавления фона, вызванного внешним излучением — мюонами космических лучей и естественной радиоактивностью, необходимо использовать активный детектор вето. Данный детектор должен окружать основной детектор эксперимента со всех сторон. Нами было предложено использовать пластиковые сцинтилляторы из старых, уже закончивших свою работу экспериментов. Выбор пал на пластиковые сцинтилляционные детекторы [14], разработанные в университете г. Тюбинген и использовавшиеся в эксперименте MAMI в ускорительном комплексе в г. Майнц,

Германия. Сцинтилляционные детекторы этого эксперимента были выполнены из пластикового (полистирольного) сцинтиллятора NE102 размером $5 \times 20 \times 300 \text{ см}^3$. Все стороны сцинтилляционных пластин полированы. Торцы пластин оптически соединены с помощью световодов из полиметилметакрилата (ПММА) с фотоумножителями XP2312В.

Размеры сцинтилляционных пластин вето детектора — $5 \times 20 \times 70 \text{ см}^3$. Фотоумножитель оптически состыковывался к торцу сцинтилляционной пластины напрямую без световода с помощью оптического клея EJ-500. Для увеличения световыхода детектора сцинтилляционная пластина оборачивается со всех сторон двумя слоями диффузно отражающего материала TYVEK 3М.

Детектор вето представляет собой 6 стенок из сцинтилляционных детекторов. Одна стенка состоит из 3 сцинтилляционных пластин, каждая из которых просматривается одним фотоумножителем XP2312В. Только одна пластина разделена на две части длиной 25 см каждая. Таким образом, сделан технологический выход для де-

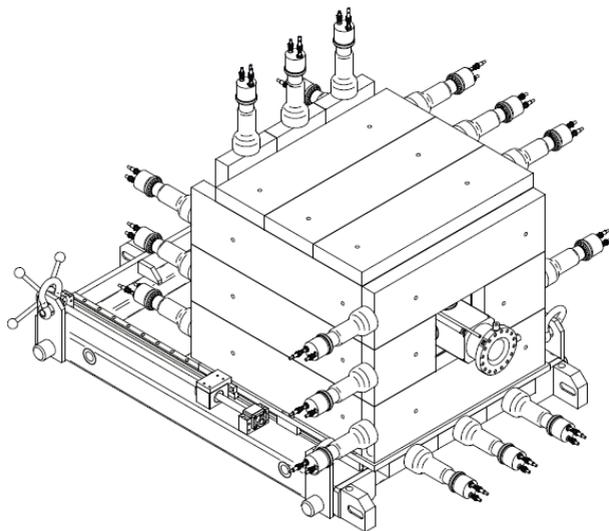


Рис. 10. Эскиз детектора вето эксперимента BabyIAXO

титорной системы. Сборочный чертеж детектора вето показан на рисунке 10.

Для измерения отклика индивидуального сцинтилляционного детектора на мюон космических лучей был создан измерительный стенд с мюонным телескопом, состоящим из двух пластиковых сцинтилляционных счетчиков размером $3 \times 12 \times 12 \text{ см}^3$ каждый. Эффективность регистрации мюонов сцинтилляционным детектором составляет 99.97%.

Контроль стабильности параметров сцинтилляционных детекторов вето детектора осуществляется при помощи разработанной нами светодиодной калибровочной системы. Данная система состоит из пяти 4-канальных быстродействующих светодиодных источников света, аналогичных описанным в предыдущих главах диссертации источникам, и оптоволоконных кабелей с сердцевиной из ПММА диаметром 1 мм. Концы кабелей закреплены на торцах сцинтилляционных пластин, противоположных торцам, на которых установлены фотоумножители. Такое расположение оптоволоконного кабеля в сцинтилляционном счетчике позволяет контролировать усиление и чувствительность фотоумножителей, прозрачность и световыход пластикового сцинтиллятора и качество оптического контакта.

Результаты главы опубликованы в работах [A9] и [A10].

В заключении приводятся основные результаты диссертационной работы:

1. Разработаны и созданы быстродействующие источники света на основе ультраярких и высокой мощности светодиодов, для калибровочных систем черенковских и сцинтилляционных детекторов экспериментов в астрофизике частиц. Спектры излучения источников света достигают максимумов на длинах волн 380 нм, 405 нм и 450 нм. Число фотонов в импульсе: для ультраярких светодиодов $\sim 10^{10}$; для светодиодов высокой мощности $\sim 10^{12}$. Длительность светового импульса: для ультраярких светодиодов $\leq 1 \text{ нс}$ (FWHM); для светодиодов высокой мощности $\sim 2.5 \text{ нс}$ (FWHM).
2. Впервые в мире разработана и создана калибровочная система с использованием наносекундных светодиодов высокой мощности ($\sim 10^{12}$ фотонов в импульсе, 2.5-3 нс (FWHM) длительность импульсов, 1–20 Гц частота повторения импульсов) на борту беспилотных летательных аппаратов.

Разработанная система успешно протестирована в калибровочных измерениях широкоугольных черенковских установок эксперимента TAIGA.

3. Разработана и создана калибровочная система на основе ультраярких светодиодов и пластиковых оптоволокон для отбора, тестирования и исследования параметров 3-х дюймовых фотоумножителей эксперимента JUNO. Общее число каналов – 34; длительность световых импульсов ~ 1 нс (FWHM); диапазон регулирования световых источника $0 - 10^8$ фотонов на импульс; диапазон изменения частоты повторения импульсов 0-100 кГц.
4. Для прототипов Баксанского большого нейтринного телескопа разработана и создана светодиодная калибровочная система на основе ультраярких светодиодов, пластиковых кабелей и диффузного рассеивателя света с использованием электронной платформы Arduino и микроконтроллера STM32F401. Разработана и создана также калибровочная система с использованием радиоактивных источников.
5. Разработаны и созданы детектор мюонного вето на основе пластиковых сцинтилляторов для эксперимента по поиску аксионов BabyIAXO и светодиодная калибровочная система с пластиковыми оптоволоконными кабелями для этого детектора.

Список публикаций по результатам диссертации

- A1. D. Voronin, A. Fazliakhmetov, N. Ushakov, A. Lukanov, B. Lubsandorzhiyev and A. Sidorenkov. Calibration system of EAS Cherenkov arrays using commercial drone helicopter // PoS(ICRC2021)268.
- A2. A. Porelli, D. Bogorodskii, M. Bruckner, ..., D. Voronin et al. Timing calibration and directional reconstruction for Tunka-HiSCORE // Journal of Physics: Conference Series, V.632, 012041 (2015).
- A3. А.Д. Луканов, Д.М. Васильев, А.Н. Фазлиахметов, ..., Д.М. Воронин и др. Баксанский Большой Нейтринный Телескоп: текущий статус // Изв. РАН. Сер. Физ., Т.87, N.7, 995-1001 (2023).

- A4. C. Cao, J. Xu, M. He, ..., D.M. Voronin et al. Mass production and characterization of 3-inch PMTs for the JUNO experiment // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, V.1005, 165347 (2021).
- A5. Liashung Ma, Sen Qian, Qi Wu, Zhile Wang, Bayarto Lubsandorzhev, Feng Gao, Zhigang Wang, Sultim Lubsandorzhev, Nikita Ushakov, Dmitriy Voronin, Zhehao Hua. Study on the time resolution limits of FPMT and SiPM under femtosecond laser // NIMA. 2023. Vol. 1055. P.168518.
- A6. A.D. Lukanov, A.A. Budzinskaya, A.N. Gangapshev, ..., D.M. Voronin, et al. Baksan Large Neutrino Telescope Project: Prototypes and Perspectives // Physics of Atomic Nuclei. V.86, N.6, 1380—1384 (2023).
- A7. N.A. Ushakov, A.N. Fazliakhmetov, A.M. Gangapshev, V.N. Gavrin, T.V. Ibragimova, M.M. Kochkarov, V.V. Kazalov, D.Yu. Kudrin, V.V. Kuzminov, B.K. Lubsandorzhev, A.D. Lukanov, Yu.M. Malyskin, G.Ya. Novikova, V.B. Petkov, A.A. Shikhin, A.Yu. Sidorenkov, E.P. Veretenkin, D.M. Voronin, E.A. Yanovich. New large-volume detector at the Baksan Neutrino Observatory: Detector prototype // Journal of Physics: Conference Series, V.1787, 012037 (2021).
- A8. D. Voronin, A. Fazliakhmetov, V. Gavrin, T. Ibragimova, B. Lubsandorzhev, A. Lukanov, A. Shikhin, A. Sidorenkov and N. Ushakov Development of calibration system for a project of a new Baksan Large Neutrino Telescope // PoS (ICRC2021) 1100.
- A9. A. Abeln, K. Altenmüller, S. Arguedas Cuendis, ..., D. Voronin, et al. Conceptual design of BabyIAXO, the intermediate stage towards the International Axion Observatory // Journal of High Energy Physics, 05, 137 (2021).
- A10. A. Abeln, K. Altenmüller, S. Arguedas Cuendis, ..., D. Voronin, et al. Axion search with BabyIAXO in view of IAXO // arXiv:2012.06634 / PoS (ICHEP2020) 631.

Список литературы

1. Скачков, Ю. Характеристики искровых счетчиков с плоско-параллельными электродами / Ю. Скачков // ПТЭ. — 1961. — Т. 6, № 6. — С. 41.
2. Мейлинг, В. Наносекундная импульсная техника / В. Мейлинг, Ф. Стари. — М.: Атомиздат, 1973. — 293–296.
3. Photomultiplier gain monitoring at the one percent level with a blue light pulser / J. Berger [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1989. — Vol. 279, no. 1. — P. 343–349.
4. *McDonald, D. S.* Studies of the Sudbury Neutrino Observatory Detector and Sonoluminescence using a Sonoluminescent Source: PhD thesis / McDonald Douglas Steven. — University of Pennsylvania, 1999. — P. 242.
5. Optical calibration hardware for the Sudbury Neutrino Observatory / B. Moffat [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2005. — Dec. — Vol. 554, no. 1–3. — P. 255–265.
6. Brenner, M. P. Single-bubble sonoluminescence / M. P. Brenner, S. Hilgenfeldt, D. Lohse // Rev. Mod. Phys. — 2002. — May. — Vol. 74, issue 2. — P. 425–484. — DOI: 10.1103/RevModPhys.74.425.
7. TAIGA—an advanced hybrid detector complex for astroparticle physics and high energy gamma-ray astronomy in the Tunka valley / N. Budnev [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2020. — Sept. — Vol. 15, no. 09. — P. C09031.
8. JUNO physics and detector // Progress in Particle and Nuclear Physics. — 2022. — Mar. — Vol. 123. — P. 103927.
9. Mass production and characterization of 3-inch PMTs for the JUNO experiment / C. Cao [et al.] // Nuclear Instruments

and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2021.— Vol. 1005. — P. 165347.

10. Интенсивность мюонов космических лучей в лаборатории глубокого заложения ГГНТ / В. Гаврин [и др.] // Препринт / ИЛИ АН СССР П-698. — 1991. — С. 3—16.
11. Баксанский большой нейтринный телескоп: текущий статус / А. Д. Луканов [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2023. — Т. 87, № 7. — С. 995—1001.
12. Physics potential of the International Axion Observatory (IAXO) / E. Armengaud [et al.] // JCAP. — 2019. — Vol. 06. — P. 047.
13. Conceptual design of BabyIAXO, the intermediate stage towards the International Axion Observatory / A. Abeln [et al.] // JHEP. — 2021. — Vol. 05. — P. 137.
14. A high-resolution, large acceptance scintillation time-of-flight spectrometer / P. Grabmayr [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1998. — Vol. 402, no. 1. — P. 85—94.

Воронин Дмитрий Михайлович
Разработка и создание калибровочных систем
для экспериментов в астрофизике частиц

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Принято в печать 26.12.2024

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,2 Зак. № 012/25 Тираж 80 экз. Бесплатно

Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук

Издательский отдел

117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а