

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук

На правах рукописи

Воронин Дмитрий Михайлович

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

Специальность 1.3.2 —

«Приборы и методы экспериментальной физики»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
Лубсандоржиев Баярто Константинович

Москва — 2024

Оглавление

	Стр.
Введение	4
Глава 1. Калибровочная система широкоугольных черенковских установок эксперимента TAIGA	11
1.1 Эксперимент TAIGA	11
1.2 Широкоугольная черенковская установка Тунка-133	15
1.2.1 Калибровочные системы с использованием ультраярких светодиодов и светодиодов высокой мощности	15
1.3 Широкоугольная черенковская установка TAIGA-HiSCORE	21
1.3.1 Высоковольтный светодиодный модуль для калибровочных систем широкоугольных черенковских установок	21
1.3.2 Калибровочные измерения установки TAIGA-HiSCORE с использованием высоковольтного светодиодного модуля	26
1.3.3 Многороторные беспилотные летательные аппараты для калибровочных систем черенковских установок	30
1.3.4 Калибровочные измерения установки TAIGA-HiSCORE с использованием беспилотного летательного аппарата	31
1.4 Узкоугольные атмосферные черенковские телескопы TAIGA-IACST	39
1.4.1 Фотоумножитель XP1911B	41
Глава 2. Калибровочная система для малогабаритных фотоумножителей нейтринного эксперимента JUNO	47
2.1 Нейтринный эксперимент JUNO	47
2.2 Система малогабаритных фотоумножителей SPMT эксперимента JUNO	51
2.3 Быстродействующий светодиодный модуль	55
2.4 Калибровочная система для массового тестирования SPMT эксперимента JUNO	56
Глава 3. Калибровочные системы полутонного прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа	73

3.1	Полутонный прототип Баксанского большого нейтринного телескопа	73
3.2	Светодиодная калибровочная система	77
3.2.1	Светодиодный модуль на основе платы ARDUINO NANO	77
3.2.2	Светодиодный модуль под управлением МК семейства STM32F4	82
3.2.3	Светодиодный модуль под управлением МК Cypress CY8C4245AXI-483	85
3.2.4	Изучение временных характеристик светодиодов с соответствующими драйверами	89
3.2.5	Светодиодный модуль для калибровки прототипов ББНТ	91
3.3	Калибровка радиоактивными источниками полутонного прототипа ББНТ	92
Глава 4. Вето детектор эксперимента BabyIAХО		98
4.1	Эксперименты IAХО и BabyIAХО	98
4.2	Детектор мюонного вето эксперимента BabyIAХО	102
Заключение		113
Список литературы		115

Введение

Актуальность и степень разработанности 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, использующиеся в качестве мишени. В черенковских нейтринных телескопах — это прозрачная вода озер (озеро Байкал — нейтринные телескопы NT-200 [1] и GVD [2]), морей (ANTARES [3], KM3NET [4]) и океанов (проекты TRIDENT [5], P-ONE [6]), очищенная ультрачистая вода (IMBIII [7], KAMIOKANDE [8], Super-KAMIOKANDE [9]) тяжелая вода (SNO [10]), большие толщи льда (IceCUBE [11] 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 же нейтринных телескопах (Borexino [12], KamLAND [13], SNO+ [14], JUNO [15]) 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 (HiRes Fly’s Eye [16], HEGRA [17], TA [18], PAO [19], TAIGA [20], LHAASO [21]). Черенковские и флуоресцентные установки регистрируют черенковское и флуоресцентное излучение, произведенные широкими атмосферными ливнями (ШАЛ) в атмосфере Земли, детекторами фотонов. Сцинтилляционные установки детектируют электромагнитную, мюонную и адронные 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. К контролируемым параметрам детектирующих сред относятся прозрачность среды (длина ослабления светового потока), световыход (эффективность преобразования поглощенной энергии частиц в фотоны) в случае сцинтилляционных детекторов, временное разрешение установок.

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.

В фотонных калибровочных системах используются различные типы источников света. На начальных этапах развития экспериментов с черенковскими и сцинтилляционными детекторами довольно широко использовались источники света на основе электрических разрядников [22—24]. 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 параметров применялись электрические разряды в благородных газах (гелий, азот, ксенон) под большим давлением (до 10-15 атмосфер). Для получения наносекундных и субнаносекундных световых импульсов применялись также ртутные реле [25—27] — реле с контактами, покрытыми ртутью. Именно такие источники использовались при массовом тестировании, отборе и исследовании параметров фотоумножителей эксперимента ИМВ [28; 29]. С электроразрядными источниками световых импульсов 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 [30; 31]. Это источник, использующий однопузырьковую сонолюминесценцию [32]. При определенных условиях устанавливаются устойчивые колебания объема, осцилляции, пузырька. При сжатии пузырька происходит явление, называемое сонолюминесценцией. При этом рождается достаточное количество фотонов для того, чтобы засветить весь детектор, все фотоумножители (9438 штук) эксперимента SNO. Длительность световых импульсов не превышает 100 пс. Спектр излучения хорошо согласовывается с чувствительностью фотоумножителей эксперимента. Для однопузырьковой сонолюминесценции каждый импульс может содержать от 10^4 до 10^7 фотонов с частотой повторения несколько десятков килогерц.

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 по длине волны излучения, и по мощности излучения. Несмотря на отличные параметры, лазеры остаются достаточно сложными системами для эксплуатации в условиях экспериментов. Немаловажным фактором является и их высокая стоимость.

Хорошим примером использования лазерных систем служит глубоководный нейтринный эксперимент на озере Байкал. В нейтринном телескопе НТ-200 использовался азотный N_2 -лазер в сочетании с лазером на красителях для смещения длины излучения на длину 470 нм [33]. Для управления амплитудой импульса применялся нейтральный, оптический аттенюатор в виде диска с переменным коэффициентом поглощения света. Изменение поглощения света осуществлялось механическим поворотом диска с помощью программно-управляемого шагового двигателя.

Создание Ш. Накамуры [34—38] в 1993 году ультраярких синих светоизлучающих диодов (светодиодов) на основе InGaN соединений открыло прекрасные возможности для разработок эффективных, компактных, надежных и недорогих калибровочных систем на основе таких светодиодов в лабораторных условиях. В настоящее время спектры излучения существующих светодиодов AlGaIn/GaN/InGaIn перекрывают диапазон спектра от достаточно глубокой ультрафиолетовой области (~ 200 нм для AlGaIn светодиодов [39; 40]) до зеленой области (~ 520 - 540 нм для InGaIn светодиодов) [34—38]. При этом следует отметить довольно узкий спектр излучения этих светодиодов ≈ 10 нм (FWHM).

Разработки быстродействующих формирователей запуска ультраярких светодиодов позволяют получить источники наносекундных и субнаносекундных световых импульсов [41—55]. Формирователи запуска создаются на основе быстродействующих СВЧ-транзисторов или лавинных транзисторов. Если в первом случае диапазон изменения амплитуды светового сигнала составляет $0 - 10^8$ фотонов в импульсе, то во втором случае удастся получить 10^9 фотонов в импульсе, однако здесь есть сложности с управлением амплитудой светового импульса. В работе [47] было показано, что, используя матрицы ультраярких светодиодов с формирователями импульсов запуска на лавинных транзисторах, можно увеличить световыход до 10^{10} фотонов в импульсе. Использование светодиодов высокой мощности позволяет получить еще больший световыход — 10^{11} - 10^{12} фотонов, при этом длительность светового импульса увеличивается до ≈ 3 нс (FWHM) [47]. Появление светодиодов высокой мощности со спектрами излучения с максимумом на длинах волн 360-380 нм позволило разрабатывать источники света, имитирующие черенковское излучение ШАЛ и позволяющие использовать их в калибровочных системах широкоугольных черенковских детекторов ШАЛ [56; 57].

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 VFR92 и VFT92 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.

Методология и методы исследования. При тестировании и отборе светодиодов для применения в калибровочных измерениях применялись методы оптической спектрометрии и метод счета коррелированных во времени фотонов. При создании программного обеспечения для плат управления светодиодными драйверами применялся метод объектно-ориентированного программирования.

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 работах, индексируемых в международных базах данных Web of Science, SCOPUS, рекомендованных ВАК:

1. D. Voronin, A. Fazliakhmetov, N. Ushakov, A. Lukanov, B. Lubsandorzhiev, A. Sidorenkov. Calibration system of EAS Cherenkov arrays using commercial drone helicopter // PoS (ICRC2021) 268;
2. A. Porelli, D. Bogorodskii, M. Brückner, ..., D. Voronin et al. Timing calibration and directional reconstruction for Tunka-HiSCORE // Journal of Physics: Conference Series, V.632, 012041 (2015);

3. 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);
4. С. Сао, J. Ху, М. Хе, . . . , 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);
5. Liashung Ma, Sen Qian, Qi Wu, Zhile Wang, Bayarto Lubsandorzhiev, Feng Gao, Zhigang Wang, Sultim Lubsandorzhiev, Nikita Ushakov, Dmitriy Voronin, Zhehao Hua. Study on the time resolution limits of FPMT and SiPM under femtosecond laser // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, V.1055, 168518 (2023);
6. 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).
7. N. Ushakov, A. Fazliakhmetov, A. Gangapshev, V. Gavrin, T. Ibragimova, M. Kochkarov, V. Kazalov, D. Kudrin, V. Kuzminov, B. Lubsandorzhiev, A. Lukanov, Yu. Malyshkin, G. Novikova, V. Petkov, A. Shikhin, A. Sidorenkov, E. Veretenkin, D. Voronin, E. Yanovich. New large-volume detector at the Baksan Neutrino Observatory: Detector prototype // Journal of Physics: Conference Series, V.1787, 012037 (2021);
8. D. Voronin, A. Fazliakhmetov, V. Gavrin, T. Ibragimova, B. Lubsandorzhiev, A. Lukanov, A. Shikhin, A. Sidorenkov, N. Ushakov. Development of calibration system for a project of a new Baksan Large Neutrino Telescope // PoS (ICRC2021) 1100;
9. 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);
10. 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.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 132 страницы, включая 108 рисунков и 1 таблицу. Список литературы содержит 153 наименования.

Глава 1. Калибровочная система широкоугольных черенковских установок эксперимента TAIGA

1.1 Эксперимент TAIGA

Космические лучи были открыты Виктором Гессом в 1912 году в серии его знаменитых полетов на воздушном шаре [58—60]. За более чем столетнюю историю космических лучей остается до конца неизвестным их происхождение — где и в каких процессах они рождаются. Поэтому поиск и изучение источников космических лучей и исследования механизмов их ускорения являются одними из основных задач современной физики. Энергетический спектр космических лучей высоких энергий имеет степенной характер ($I \sim E^{-\gamma}$) с рядом особенностей, рис. 1.1 — цитируется из [61], и простирается до энергий более 10^{20} эВ. При энергии $\sim 3 \times 10^{15}$ эВ наблюдается излом («колени») в энергетическом спектре космических лучей, открытый советскими физиками Г.Б. Христиансенем и Г.В. Куликовым на установке ШАЛ-МГУ в 1956 году [62]. В области колена происходит «укручение» спектра и показатель степени меняется с $\gamma \sim 1.7$ на $\gamma \sim 2.1$. В области энергий $\sim 10^{17}$ эВ достигается второй излом спектра, часто называемый «железным пиком». При энергии $\sim 3 \times 10^{18}$ эВ, известным как «лодыжка», энергетический спектр космических лучей становится более пологим — показатель степени практически возвращается к значению, которое было до первого излома спектра — $\gamma \sim 1.7$. По современным представлениям в этой области происходит переход от галактических космических лучей к внегалактическим. Следующей особенностью спектра является так называемое «обрезание» спектра космических лучей при энергии $\sim 5 \times 10^{19}$ эВ, обусловленное взаимодействием космических лучей с фотонами микроволнового (реликтового) излучения. Это явление было предсказано в 1966 году Г.Т. Зацепиным и В.А. Кузьминым [63] и независимо от них К. Грейзенем [64], поэтому оно получило название «предел Зацепина-Кузьмина-Грейзена» (GZK limit). Следует отметить, что это «обрезание» спектра не является резким, поскольку частицы, рожденные на расстояниях менее 50 Мпк от Земли, могут иметь энергии, превышающие этот предел. До сегодняшнего дня наибольшей энергией обладает частица, зарегистрированная в эксперименте Fly's Eye 15 октября 1991

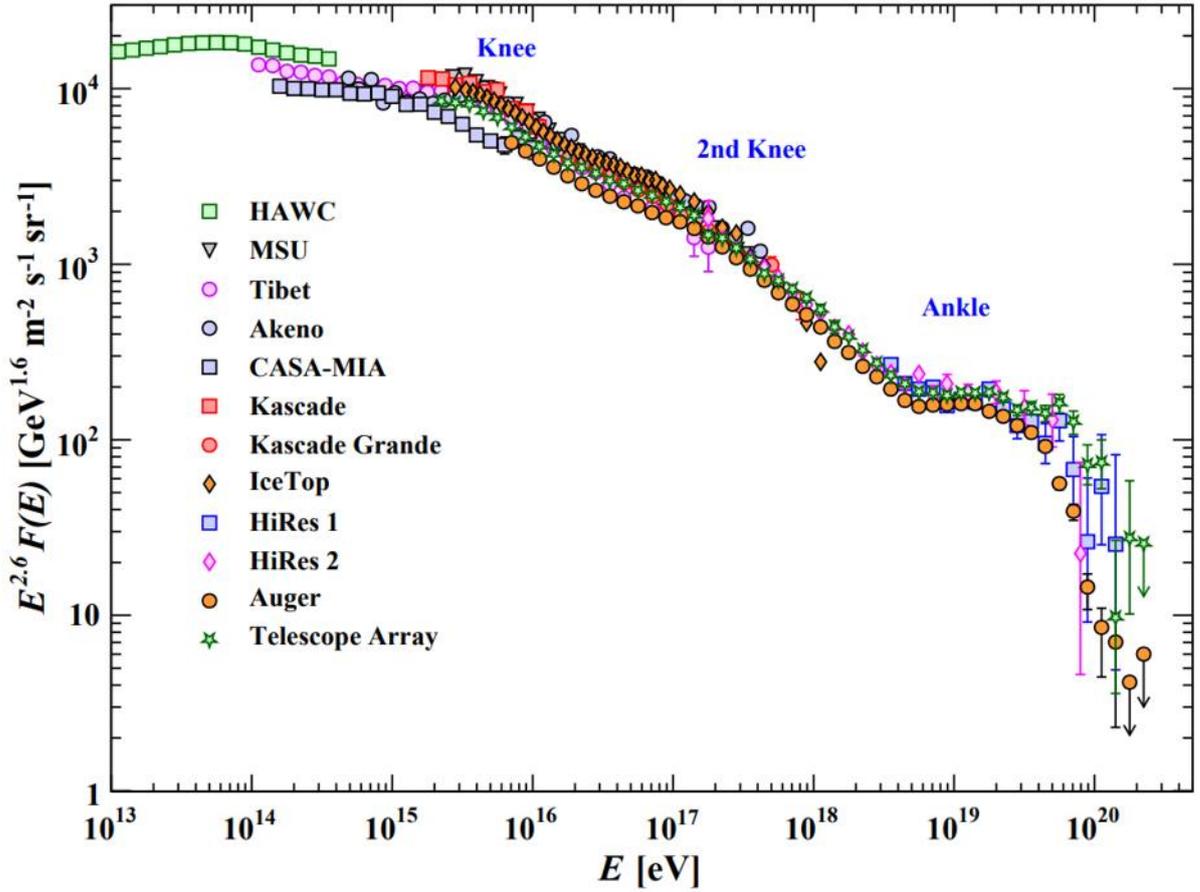


Рисунок 1.1 — Энергетический спектр космических лучей [61].

года. Энергия этой частицы, названной «Oh-My-God» составила $\sim 3.2 \times 10^{20}$ эВ [65; 66]. Относительно недавно, в 2021 году, экспериментом Telescope Array было зарегистрировано событие с энергией 2.4×10^{20} эВ, получившее название «частица Аматерасу» [67].

Важную роль в поисках и исследованиях источников космических лучей и механизмов их ускорения играет наземная гамма-астрономия высоких энергий, основанная А.Е. Чудаковым [68] в начале 1960-годов и получившая бурное развитие в последние десятилетия [69–71]. Решающую роль в успехе наземной гамма-астрономии сыграли атмосферные черенковские узкоугольные телескопы изображения ИАСТ. За последние 20 лет телескопами MAGIC [72], H.E.S.S. [73] и VERITAS [74] зарегистрировано огромное количество галактических и внегалактических локальных источников гамма-квантов высоких энергий — остатков сверхновых звезд, активных галактических ядер и т.д. Однако энергетический диапазон гамма-квантов, регистрируемых телескопами ИАСТ, простирается до ~ 100 ТэВ, что не дает возможности однозначно разделить лептонные и адронные механизмы ускорения космических лучей. В

работе [75] было предложено использовать гибридный подход, сочетающий в одном эксперименте возможности узкоугольных черенковских телескопов IAST и широкоугольных черенковских установок большой площади. Именно такой подход осуществляется в эксперименте TAIGA [20; 76–80].

Изучение энергетического спектра первичного космического излучения — одна из основных задач в астрофизике частиц, решение которой даст понимание механизмов ускорения частиц до сверхвысоких энергий. Для изучения космических лучей существует два подхода: прямой и косвенный. К первому методу можно отнести различные спутниковые эксперименты, регистрирующие непосредственно сами частицы первичного космического излучения. Такой подход имеет ряд технических ограничений, основным из которых можно считать их относительную компактность, что статистически снижает вероятность детектирования частицы. Второй подход — использование установок, находящихся на поверхности земли, в результате чего атмосфера Земли используется как чувствительный элемент. Попадая в атмосферу Земли, частица первичных космических лучей начинает взаимодействовать с ядрами атмосферы, с образованием вторичных частиц — этот процесс носит лавинообразный характер. Таким образом образуются широкие атмосферные ливни (ШАЛ). Широкие атмосферные ливни можно разделить на компоненты — адронную, мюонную и электрон-фотонную. Заряженные компоненты порождают в атмосфере черенковское и флуоресцентное излучение.

В силу степенного характера спектра космических лучей с ростом энергии поток космических лучей резко уменьшается. Так при энергиях в области излома спектра ($\sim 3 \times 10^{15}$ эВ) поток космических лучей составляет ~ 1 частица на м^2 в год, в области «лодыжки» ($\sim 3 \times 10^{18}$ эВ) поток составляет всего ~ 1 частица на км^2 в год, а в области энергий $\sim 10^{20}$ эВ поток падает до ~ 1 частицы на км^2 в столетие. Если первичной частицей будет протон с энергией $\sim 10^{19}$ эВ, то площадь, покрываемая ШАЛ на уровне земли, будет равна $\sim 10 \text{ км}^2$. Поэтому для эффективной регистрации событий от ШАЛ на наземных установках стремятся к увеличению площади, на которой размещаются детекторы.

Эксперимент TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma Astronomy) [20; 76–80] — 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

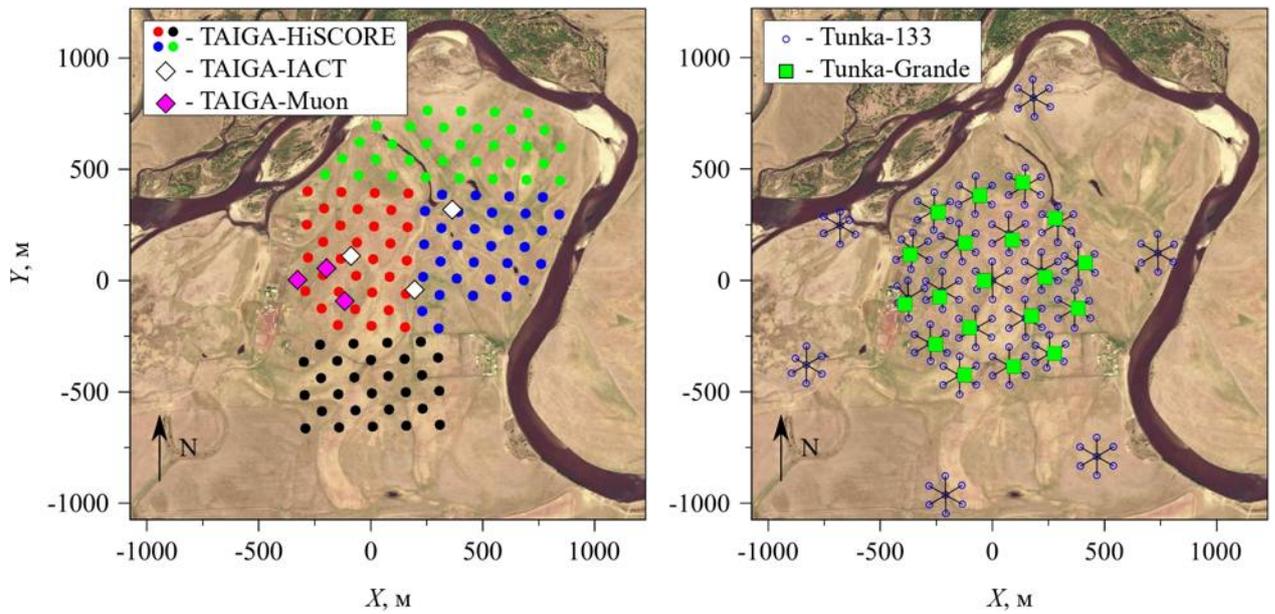


Рисунок 1.2 — Расположение станций установок TAIGA-HiSCORE, TAIGA-IACT, TAIGA-MUON, Tunka-133, Tunka-Grande.

самой юго-западной точки озера Байкал. Высота над уровнем моря составляет 675 м. В состав эксперимента входят широкоугольные черенковские установки Tunka-133 [81] и TAIGA-HiSCORE [82], сцинтилляционные установки Tunka-Grande [83] и TAIGA-Muon [84], сеть узкоугольных атмосферных черенковских телескопов изображения TAIGA-IACT [85] и установка по радиодетектированию широких атмосферных ливней Tunka-REX [86]. Схема расположений установок эксперимента TAIGA представлена на рис. 1.2.

Для каждой установки есть определённый набор задач. Например, для установки Tunka-133 — изучение спектра первичного космического излучения, а также его массовый состав в диапазоне от 10^{15} до 10^{18} эВ. TAIGA-HiSCORE выполняет те же задачи, что Tunka-133, но нижняя граница измеряемого диапазона начинается от $\sim 2 \times 10^{14}$ эВ для протонов и от $\sim 6 \times 10^{13}$ эВ для гамма-квантов. Для TAIGA-IACT основная цель — поиск и исследование локальных источников гамма-квантов с энергиями $\geq 10^{12}$ эВ. Совместная работа широкоугольных черенковских установок и узкоугольных черенковских телескопов позволит существенно расширить возможности поиска и исследования ускорителей космических лучей — ПэВатронов.

1.2 Широкоугольная черенковская установка Тунка-133

Tunka-133 — установка, регистрирующая черенковское излучение от ШАЛ. Состоит из 25 кластеров, в каждом по 7 оптических модулей; один модуль стоит в центре правильного шестиугольника, длина стороны которого равна 85 м, а остальные 6 располагаются по его вершинам, схема взаимного расположения оптических модулей приведена на рис. 1.3 [87]. Оптический модуль представляет собой вертикально установленный металлический цилиндрический бак (высотой 60 см, диаметром 50 см), внутри которого установлен фотоумножитель Hamamatsu R1408 с полусферическим фотокатодом диаметром ~ 20 см (8") вместе с делителем напряжения, источником высокого напряжения и двумя предусилителями (для анодных сигналов и сигналов с одного из динодов), также для проведения калибровочных измерений установлен светодиодный источник света. Входное окно модуля выполнено из органического стекла с нагревательными элементами, что необходимо для борьбы с образованием инея либо росы. Металлический бак оборудован моторизированной крышкой, защищающей входное окно от внешних воздействий. Схема, иллюстрирующая внутреннее устройство оптического модуля, показана на рис. 1.4 [88].

Для каждого кластера рядом с центральным оптическим модулем располагается отдельный модуль с регистрирующей электроникой (АЦП (12-битные FADC с частотой дискретизации 200 МГц), контроллер управления оптическими детекторами, контроллер управления кластером), в который поступают сигналы от зарегистрированных событий от всех 7 детекторов. После выработки локального триггера данные с АЦП считываются и передаются в центр сбора данных (ЦСД).

1.2.1 Калибровочные системы с использованием ультраярких светодиодов и светодиодов высокой мощности

Каждый оптический модуль (рис. 1.5) установки Тунка-133 снабжен калибровочным источником света [89], разработанным специально для этих целей

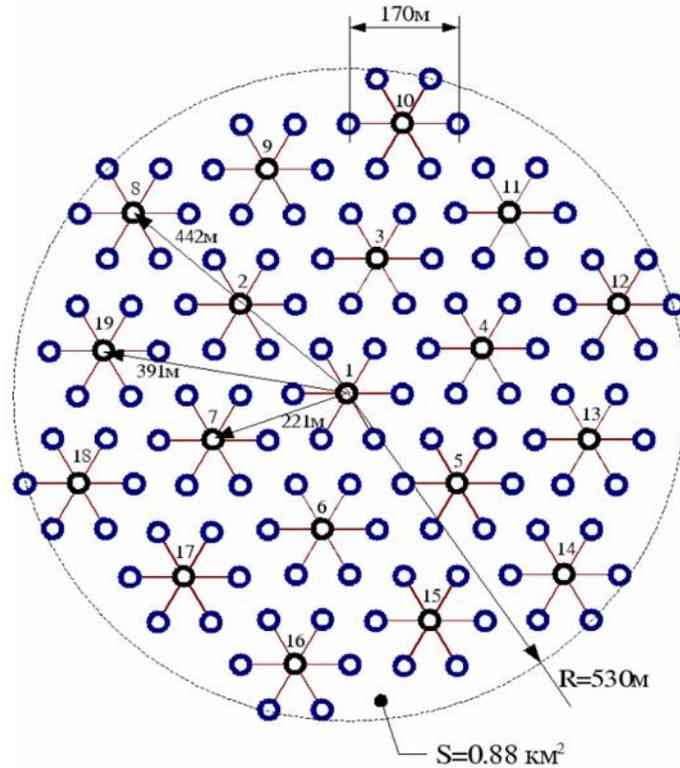


Рисунок 1.3 — Схема расположения детекторов установки Tunka-133 (здесь не указаны ещё 6 «внешних» кластеров).

на основе ультраярких синих светодиодов на одиночных квантовых ямах (SQW) со структурой InGaN. На рис. 1.6 представлена электрическая принципиальная схема и фотография быстродействующего светодиодного драйвера. Размеры печатной платы $35 \times 35 \text{ мм}^2$. В данной реализации драйвера применяется миниатюрный трансформатор для гальванической развязки от электроники кластера. По техническим условиям эксперимента в источнике света используется положительное напряжение питания. Формирователь импульсов запуска светодиода (драйвер) разработан на базе классической идеи Дж. Капустинского [52], т.е. принцип работы драйвера основан на быстром разряде небольшой ёмкости через комплементарную пару быстродействующих транзисторов.

Светодиод для источника света выбран марки GNL3014BC размером 3 мм и со спектром излучения, достигающим максимума на длине волны $\lambda = 470 \text{ нм}$. Образцы данной марки светодиода отличаются большим разнообразием кинетики свечения при прохождении через них коротких импульсов тока. Для использования в оптических модулях установки Tunka-133 отобраны образцы с самой быстрой кинетикой свечения без медленной компоненты. Необходимость применения положительного источника питания светодиода привело к некоторому удлинению длительности световых импульсов светодиода ($\sim 3 \text{ нс}$

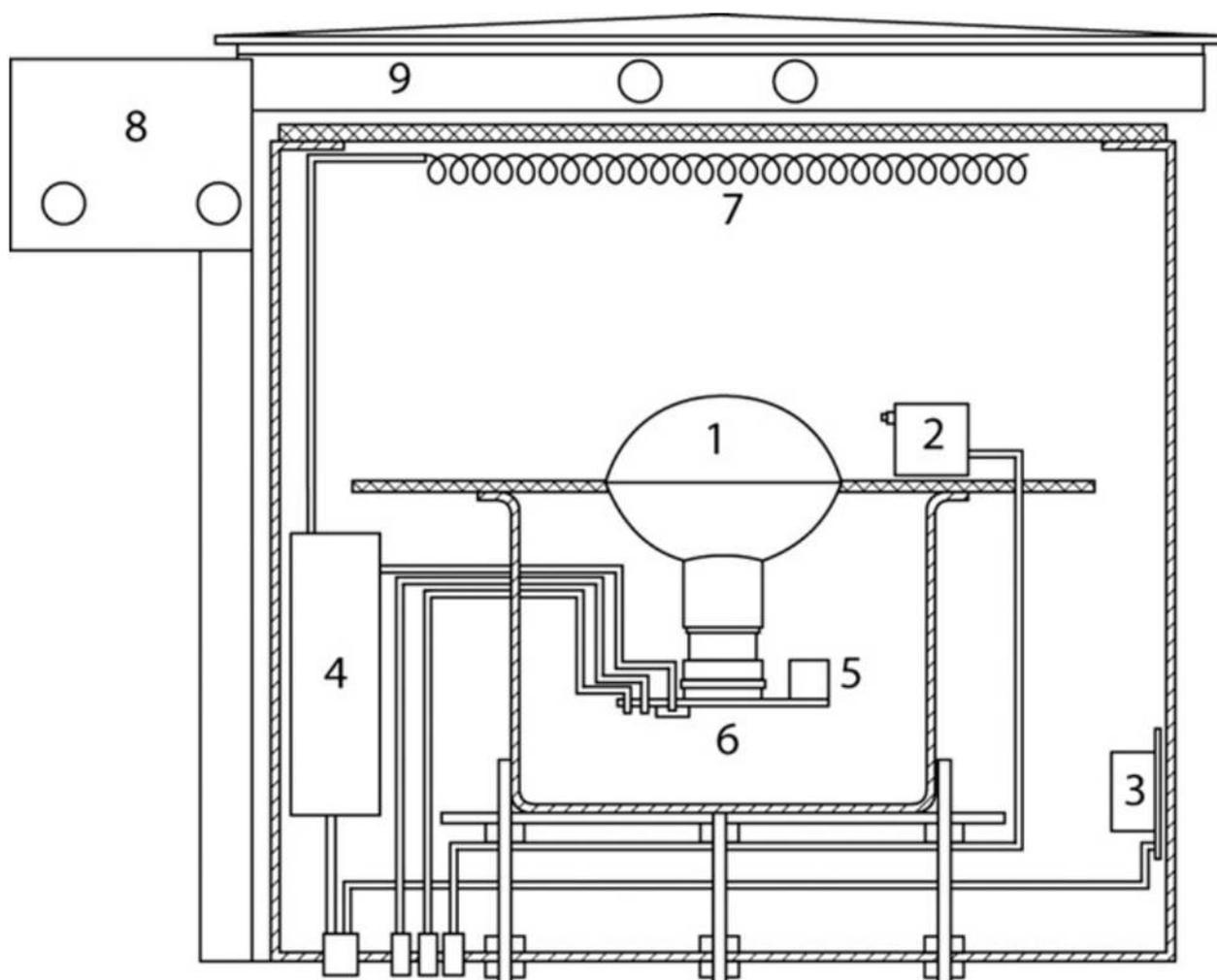


Рисунок 1.4 — Схема компоновки оптического модуля установки Tunka-133. 1 — фотоумножитель Hamamatsu R1408, 2 — светодиодный калибровочный источник, 3 — контроллер температуры, 4 — DC-DC преобразователь и управление нагревом спиралей на входном окне, 5 — предусилитель, 6 — делитель напряжения для ФЭУ, 7 — нагревательные элементы входного окна, 8 — моторизованный привод крышки, 9 — корпус оптического модуля.

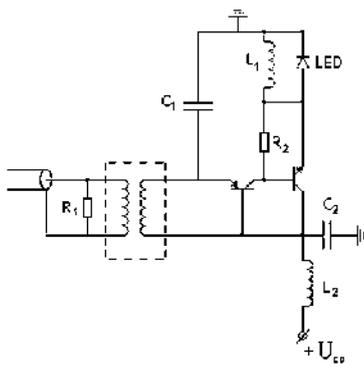


а)

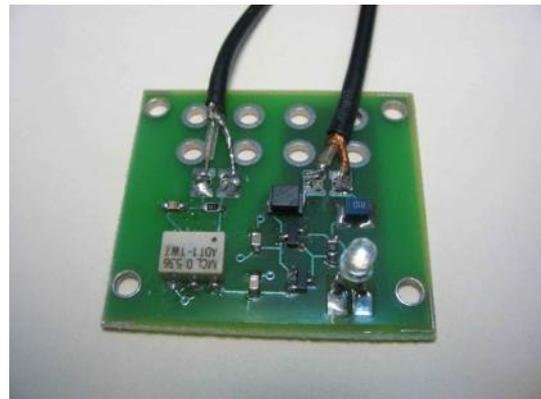


б)

Рисунок 1.5 — Оптический модуль установки Тунка-133: а) оптический модуль; б) входное окно оптического модуля.



а)



б)

Рисунок 1.6 — Светодиодный калибровочный источник для установки Тунка-133: а) электрическая принципиальная схема драйвера; б) фотография драйвера.

(FWHM)). Амплитуда светового импульса может меняться программно в широком диапазоне ($0 - 10^8$ фотонов в импульсе) [89].

В работах [43; 47; 87] было предложено использовать более мощные источники наносекундных световых импульсов для засветки всех или большей части оптических модулей установки Тунка-133. Для этого источник света помещается на помосте или шесте (2-3 м высотой), возвышающемся над установкой в её геометрическом центре. Оптические модули при таких калибровочных измерениях снабжаются отражателями света для эффективной засветки фотокатодов

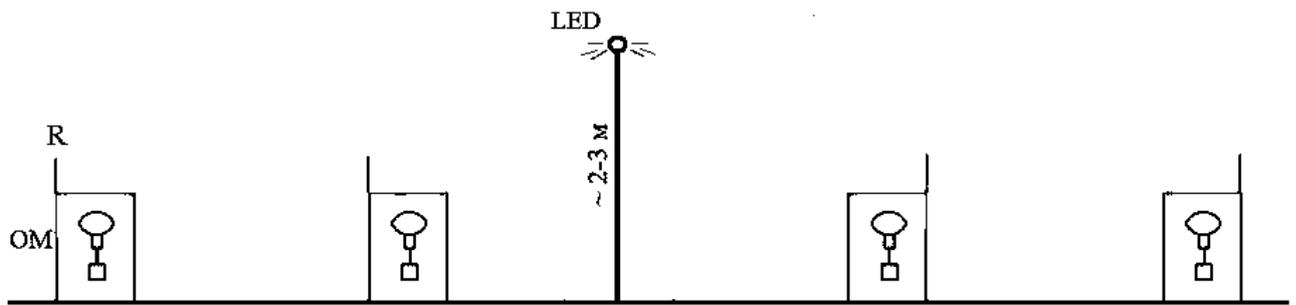


Рисунок 1.7 — Калибровочная система с одиночным наносекундным источником световых импульсов повышенной мощности для широкоугольных черенковских установок эксперимента TAIGA. LED — источник световых импульсов на основе светодиодов высокой мощности. ОМ — оптические модули; R — отражатели света [47].

фотоумножителей оптических модулей. Общая схема таких калибровочных измерений показана на рис. 1.7 [87].

Появление синих светодиодов высокой мощности открыло новые возможности для разработок наносекундных источников света для калибровочных систем. Такие светодиоды способны выдерживать наносекундные импульсы тока с амплитудой 10 А и выше. Для этой цели были разработаны мощные наносекундные источники света на базе светодиодов высокой мощности XR7090 производства компании Cree синего свечения «Royal Blue» (максимум спектра излучения на длине волны $\lambda = 450$ нм). В формирователе импульсов запуска светодиода высокой мощности использовались два лавинных транзистора ZTX415. Для обеспечения равномерного 2π излучения, необходимого для засветки всей или большей части установки, четыре таких источника света были собраны в матрицу и запускались от одного генератора импульсов (рис. 1.8) [47; 87]. Все четыре источника света закреплялись на одной платформе и ориентировались по четырем сторонам света, как показано на фотографии на рис. 1.9 [87]. Полный угол излучения светодиодов XR7090 составляет 120° . В таких матрицах подбором образцов светодиодов и тонкой подстройкой формирователей импульсов запуска удастся достичь высокой степени одновременности срабатывания и идентичности формы светового импульса [47].

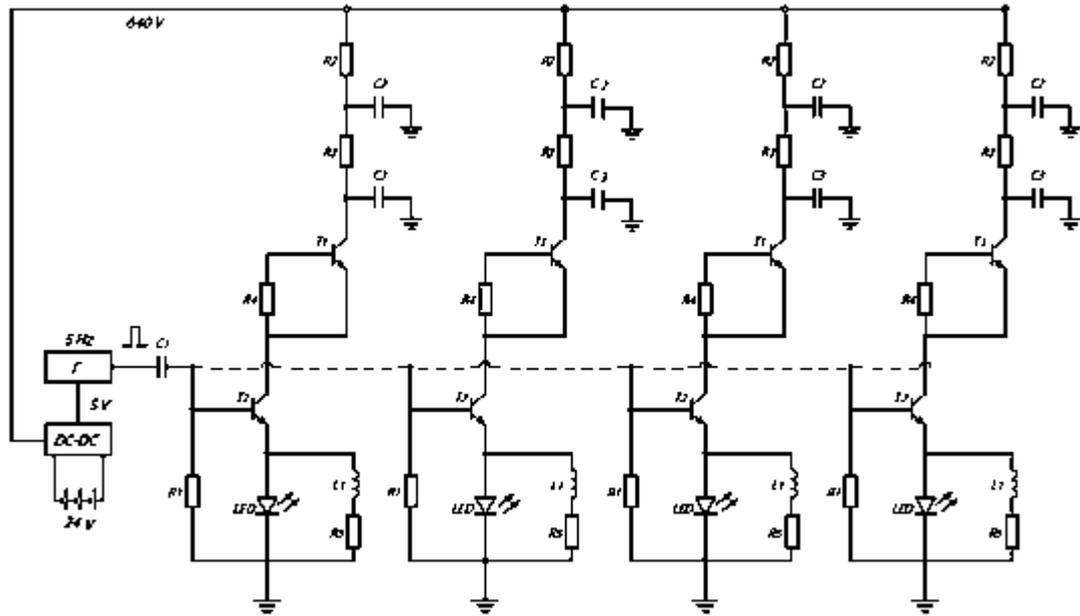


Рисунок 1.8 — Принципиальная электрическая схема «кругового» источника наносекундных импульсов света на базе светодиодов высокой мощности [47].



Рисунок 1.9 — Фотография «кругового» наносекундного источника световых импульсов на базе светодиодов высокой мощности [47].

1.3 Широкоугольная черенковская установка TAIGA-HiSCORE

TAIGA-HiSCORE (Hundred Square km Cosmic ORigin Explorer) — широкоугольная установка, регистрирующая черенковский свет от ШАЛ [90]. В состав установки входят 120 оптических станций, на рис. 1.10 оптическая станция с расположенным рядом модулем с электроникой. В состав каждой оптической станции входят 4 ФЭУ Hamamatsu R7801-100. Для увеличения светосбора применяются конуса Винстона (рис. 1.11), благодаря чему площадь светосбора достигает $\sim 0.5 \text{ м}^2$. Для увеличения динамического диапазона сигнал с ФЭУ снимается не только с анода, но и с пятого динода. Сигналы, прошедшие через предусилители, поступают в модуль со считывающей электроникой; для каждой оптической станции модуль со считывающей электроникой располагается в непосредственной близости. Далее сигналы поступают на аналоговый сумматор и АЦП (14-битный с частотой дискретизации 2 ГГц). Аналоговое суммирование позволяет снизить энергетический порог в два раза. После АЦП данные передаются в центр сбора данных через оптоволоконную линию. Все оптические станции синхронизированы между собой, для чего несколько раз в год проводятся соответствующие калибровочные измерения с применением высоковольтного светодиодного источника.

1.3.1 Высоковольтный светодиодный модуль для калибровочных систем широкоугольных черенковских установок

Как уже упоминалось в пункте 1.2.1 данной главы, светодиоды высокой мощности открывают новые возможности для разработок наносекундных источников света для калибровочных систем. Использование двух последовательно включенных лавинных транзисторов FMMT415 (корпус SOT23) (или ZTX415 в корпусе TO-92-3) совместно со светодиодом высокой мощности на основе InGaN/GaN позволяет достичь длительности световых импульсов 2-3 нс с количеством фотонов в каждом импульсе $10^{11} - 10^{12}$. Принципиальная схема формирователя импульсов запуска светодиода показана на рис. 1.12.



Рисунок 1.10 — Оптический модуль установки TAIGA-HiSCORE в открытом положении и модуль электроники.



Рисунок 1.11 — Конус Винстона для установки TAIGA-HiSCORE.

Нами был разработан компактный высоковольтный светодиодный источник света (структурная схема изображена на рисунке 1.13) с возможностью его размещения на менее габаритных летательных аппаратах. На основе схемы (рисунок 1.12) была разработана печатная плата. Питание данный модуль получает от основной аккумуляторной батареи через разветвитель (напряжение полностью заряженного аккумулятора составляет 25.2 В). Далее напряжение

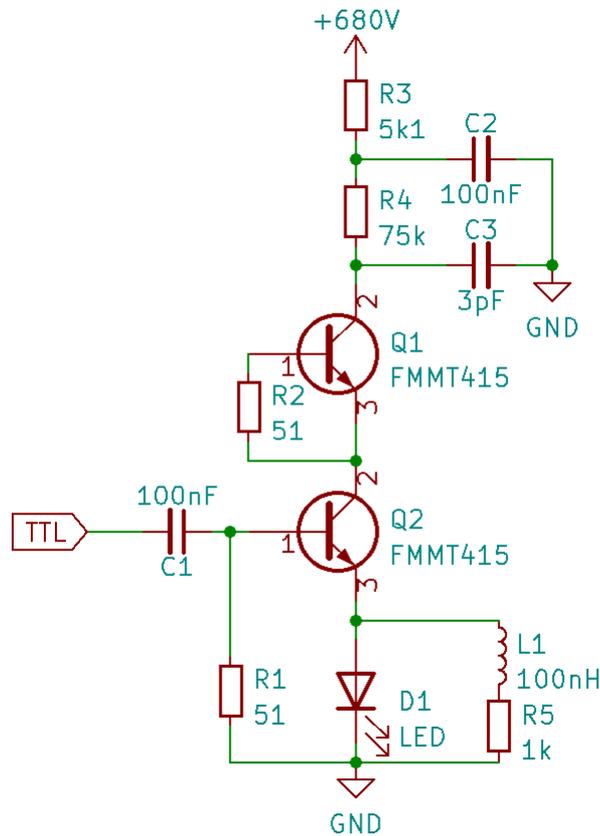


Рисунок 1.12 — Принципиальная схема высоковольтного светодиодного драйвера.

поступает на два понижающих преобразователя: выход одного настроен на 9 В, другого — 5 В. Напряжение 9 В необходимо для работы повышающего преобразователя с 9 В до 680 В, а напряжение 5 В используется для генератора запускающих импульсов (частота следования импульсов может регулироваться путём изменения номиналов конденсатора и резистора во времязадающей цепи, для данного светодиодного блока генератор настроен на 20 Гц). Для высоковольтного светодиодного источника света был изготовлен корпус, позволяющий достичь универсальности крепления к любому летательному аппарату.

На рис. 1.14 представлено расположение внутренних компонентов высоковольтного светодиодного модуля. На печатной плате чёрного цвета располагается схема высоковольтного светодиодного драйвера с установленным светодиодом 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 MATEK MICRO BCS (6-30V TO 5V/9V-ADJ). Подключение к питанию осуществляется через разъём

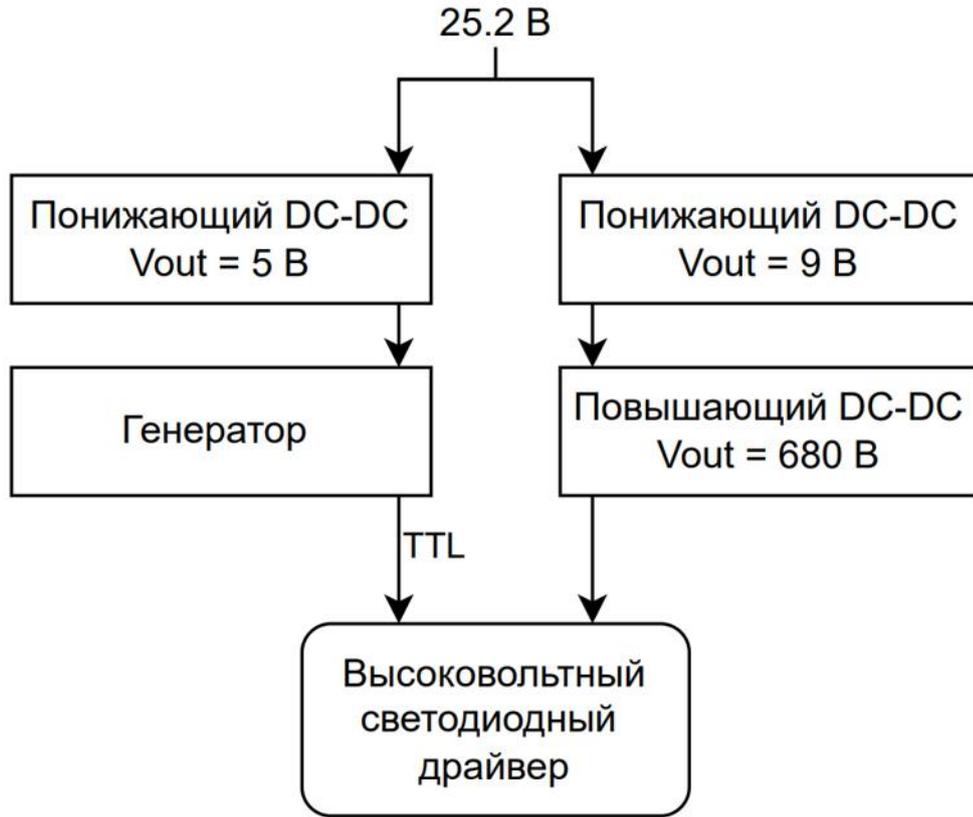


Рисунок 1.13 — Структурная схема высоковольтного светодиодного блока.

ХТ60, выведенный наружу корпуса. В собранном виде светодиодный модуль представлен на рис. 1.15.

В данном блоке применяются светодиоды фирмы CREE серии XR-E 7090 и XPE со спектрами излучения с максимумами на длинах волн 460 нм и 380 нм соответственно. С учётом установленной линзы угол раствора светового конуса составляет 120° для этих светодиодов.

Вес светодиодного модуля составляет 115 гр, габариты — 124 мм×52 мм×25 мм (Д×Ш×В). Так как данный модуль может быть закреплён на небольших летательных аппаратах, то он может быть самой нижней его точкой, которая будет соприкасаться с поверхностью взлёта и посадки, поэтому конструкция корпуса модуля предусматривает расположение светодиода в некотором углублении для защиты от механических повреждений.

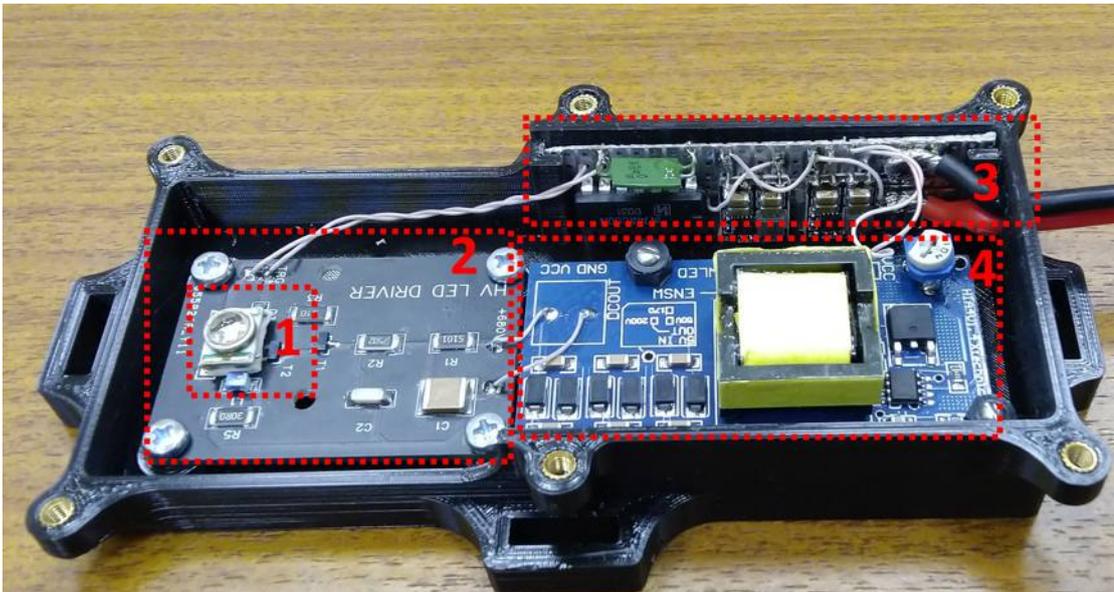


Рисунок 1.14 — Высоковольтный светодиодный модуль. 1 — светодиод высокой мощности, 2 — печатная плата высоковольтного светодиодного драйвера, 3 — макетная плата, на которую поступает питание от батареи летательного аппарата, также здесь находятся генератор запускающих импульсов для драйвера и два понижающих преобразователя напряжения, 4 — повышающий преобразователь напряжения.



Рисунок 1.15 — Высоковольтный светодиодный модуль с закрытой крышкой.

1.3.2 Калибровочные измерения установки TAIGA-HiSCORE с использованием высоковольтного светодиодного модуля

Разработанный высоковольтный светодиодный модуль был использован в калибровочных измерениях черенковской установки TAIGA-HiSCORE с девятью оптическими станциями. Модуль использовался в наземном варианте, т.е. он устанавливался вне установки на расстоянии ~ 100 м от периметра сети оптических станций установки на некотором возвышении над плоскостью оптических станций. Частота запуска светодиода была настроена на значение 5 Гц. На оптических станциях во время измерений устанавливались отражатели света под углом 45 градусов по направлению к светодиодному модулю. Схема измерений показана на рис. 1.16. Калибровочные измерения проводились для определения систематических временных сдвигов и временного разрешения индивидуальных оптических станций. На рис. 1.17а показано амплитудное распределение отклика одной из оптических станций установки. Хорошо виден пик в районе 730 канала. Длинный хвост распределения в малых амплитудах обусловлен вкладом событий от ШАЛ. Триггерным условием установки является срабатывание 4 станций во временном окне 1500 нс. Если отобрать события, когда срабатывают все девять станций установки, то события, выделенные синим цветом в распределении на рис. 1.17б полностью исчезают. Остается почти идеальное гауссовское распределение со средним числом фотоэлектронов ~ 1500 ф.э. На рис. 1.17б представлено распределение по множественности, подтверждающее данное заключение.

Координаты источника света и оптических станций были измерены с хорошей точностью (< 1 см). Обозначим x_i, y_i, z_i координаты i -ой оптической станции; $x_{\text{ис}}, y_{\text{ис}}, z_{\text{ис}}$ — координаты источника света; $t_{\text{ис}}$ — время появления светового импульса в источнике света; L_i — расстояние от источника света до i -той оптической станции. Время срабатывания i -той оптической станции можно записать в таком виде:

$$t_i = \frac{1}{c} \sqrt{(x_i - x_{\text{ис}})^2 + (y_i - y_{\text{ис}})^2 + (z_i - z_{\text{ис}})^2} + t_{\text{ис}} = \frac{L_i}{c} + t_{\text{ис}}, \quad (1.1)$$

где c — скорость света. Здесь предполагается сферически изотропное распространения фотонов от источника, рис. 1.18.

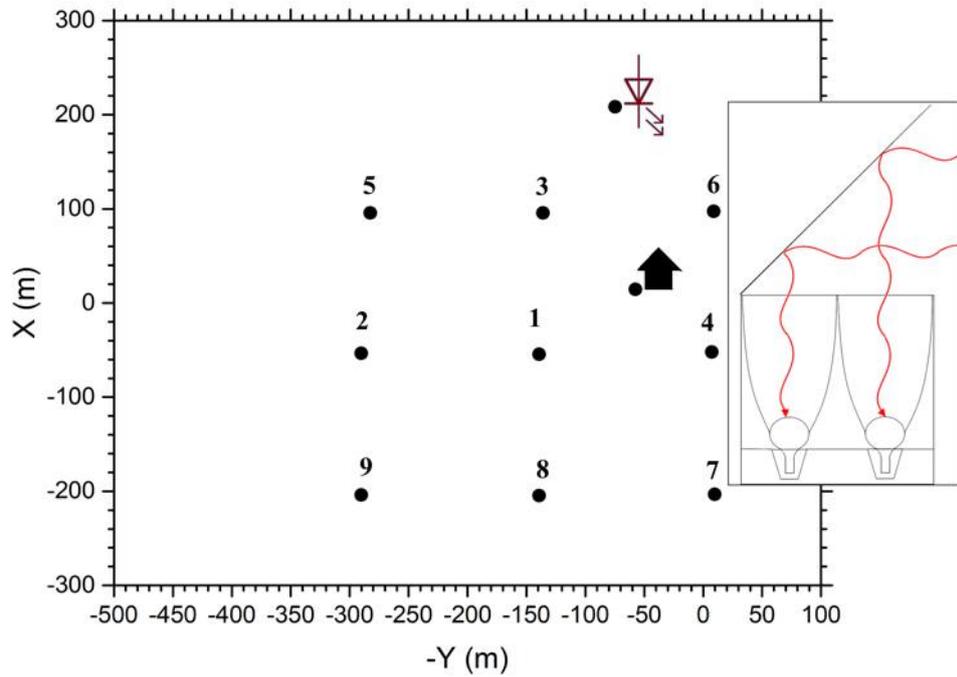


Рисунок 1.16 — Схема временной калибровки установки TAIGA-HiSCORE с использованием калибровочной системы с источником света на основе светодиода высокой мощности.

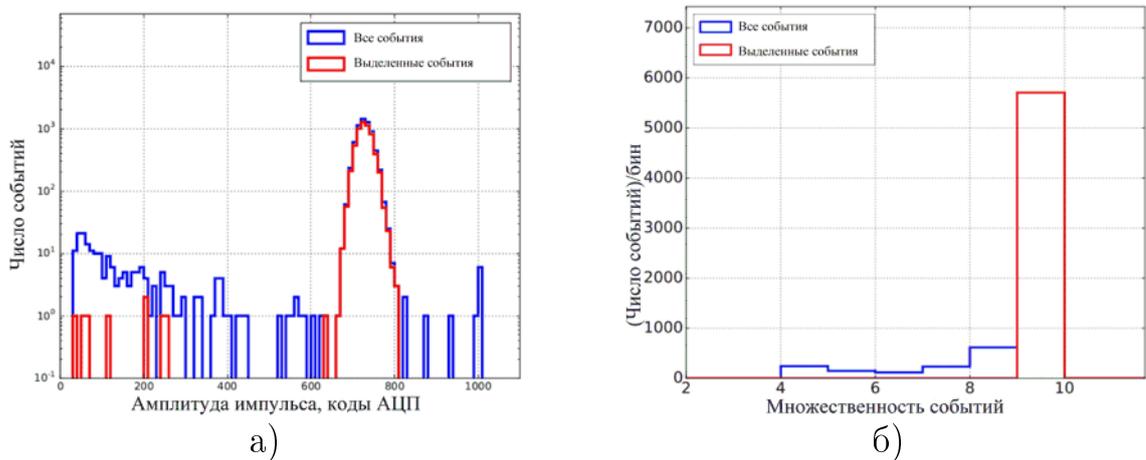


Рисунок 1.17 — Зарегистрированные события во время калибровки [91; 92]: а) амплитудное распределение. Красным цветом выделены события при срабатывании 9 станций в определённом временном окне; б) распределение по множественности.

Тогда истинное время пролета фотонов от источника света до i -той оптической станции будет равно $\Delta T_i = t_i - t_{\text{ис}}$. В таком случае, существующий систематический сдвиг времени срабатывания i -той оптической станции, обозначим его $\Delta t_i^{\text{сдв}}$, можно определить как разницу между измеренным временем пролета фотонов $\Delta T_i^{\text{изм}}$ и расчетным временем $\Delta T_i^{\text{расч}}$:

$$\Delta t_i^{\text{сдв}} = \Delta T_i^{\text{изм}} - \Delta T_i^{\text{расч}} = t_i^{\text{расч}} - t_{\text{ис}} - \frac{L_i}{c}. \quad (1.2)$$

Значение $t_{\text{ис}}$ неизвестно в данных измерениях, поэтому времена срабатывания всех оптических станций должны быть определены относительно времени срабатывания $t_{\text{реп}}^{\text{изм}}$ произвольно выбранной реперной оптической станции:

$$\Delta t_i^{\text{сдв}} = t_i^{\text{изм}} - t_{\text{реп}}^{\text{изм}} - \frac{(L_i - L_{\text{реп}})}{c}, \quad (1.3)$$

здесь $L_{\text{реп}}$ — расстояние между источником света и реперной оптической станцией. Выберем для этих целей оптическую станцию №3, рис. 1.16.

Следует отметить, что существует техническая возможность для точного определения значения $t_{\text{ис}}$, используя временную отметку лавинного пробоя транзисторов формирователя запуска светодиода в источнике света.

На рис. 1.19 показаны распределения времен срабатывания оптических станций относительно станции №3. Среднее значение σ для всех распределений, представленных на рис. 1.19, составляет ~ 0.55 нс. Считая, что таким же значением σ обладает и реперная станция, можно оценить временное разрешение индивидуальной оптической станции:

$$\sigma(t) \sim \frac{\sigma(\Delta t_i^{\text{сдв}})}{\sqrt{2}} = \frac{0.55}{\sqrt{2}} = 0.39 \text{ нс}. \quad (1.4)$$

Нужно отметить, что полученная величина $\sigma(t)$ включает в себя временную неопределенность процесса отражения света от отражателя и электронной системы регистрации сигналов. В силу этого величину $\sigma(t) = 0.39$ нс можно считать верхним пределом временного разрешения оптической станции черенковской установки TAIGA-HiSCORE.

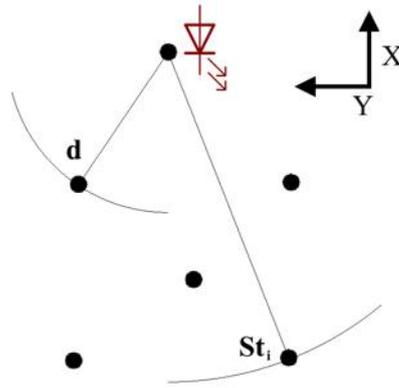


Рисунок 1.18 — Схема распространения фотонов в калибровочных измерениях установки TAIGA-HiSCORE с использованием калибровочной системы с источником света на основе светодиода высокой мощности.

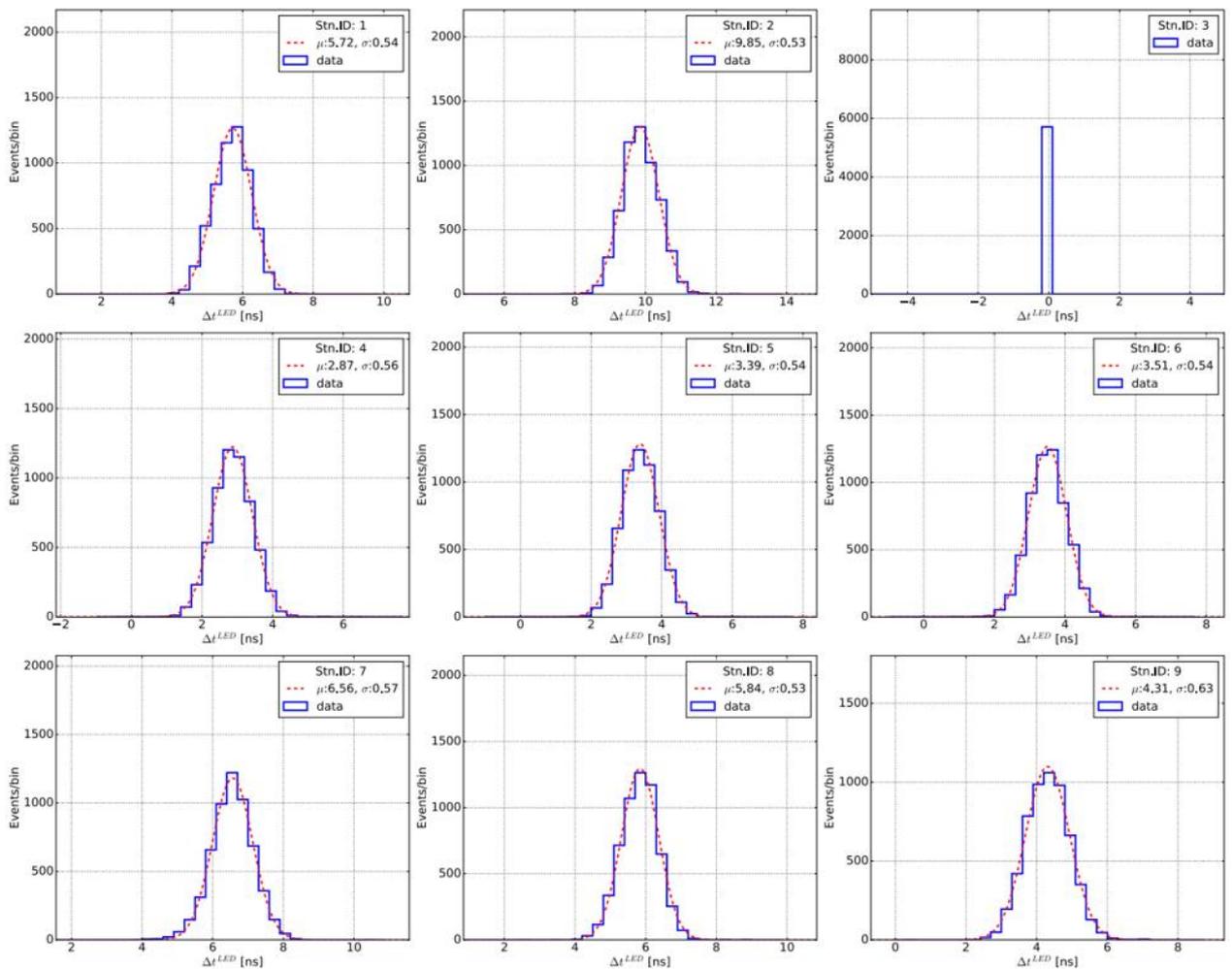


Рисунок 1.19 — Распределение времени срабатывания оптических станций установки TAIGA-HiSCORE относительно станции №3 в калибровочном эксперименте с использованием калибровочной системы с источником света на основе светодиода высокой мощности [92].

1.3.3 Многороторные беспилотные летательные аппараты для калибровочных систем черенковских установок

Установки, регистрирующие черенковское излучение от широких атмосферных ливней, представляют собой разнесенные на некоторой площади оптические модули. Расстояние между соседними оптическими модулями может достигать нескольких сотен метров. Определение начального времени срабатывания T_0 для каждого оптического модуля является одной из основных задач, решаемых во время калибровочных измерений. Полученное значение T_0 необходимо при реконструкции событий, а именно: для определения направления прихода ШАЛ. Идеальный случай проведения калибровки установок такого типа — использование одного единственного источника света, способного засветить все оптические модули одновременно.

На практике этот вариант, описанный в предыдущем параграфе данной главы, сопряжен с определенными трудностями для практического осуществления «с земли» — на пути световых импульсов располагаются другие оптические модули, перекрывающие доступ к следующим. Также коррективы могут вносить особенности рельефа местности и другие объекты. Так, например, для установки TAIGA-HiSCORE калибровочные измерения проводились следующим образом: светоотражающие конструкции размещались на оптических модулях, чтобы корректно направить свет от светодиодного источника, расположенного на одной из станций Tunka-Grande. Были изготовлены 15 отражателей света, которые после проведения калибровки, необходимо было переставлять на другие оптические модули, что существенно замедляет темп проведения калибровочных измерений. Использование наземного источника света с применением светоотражающих панелей приводит к тому, что на калибровку всех оптических модулей установки TAIGA-HiSCORE может потребоваться до недели времени.

Для решения задачи одновременной калибровки как можно большего количества оптических модулей было предложено использование многороторных беспилотных летательных аппаратов, с установленным высоковольтным светодиодным источником. В следующих пунктах будет дано описание применяемого высоковольтного светодиодного источника с установленным светодиодом высокой мощности, а также двух платформ: коммерческий гексакоптер DJI Matrice 600 Pro и квадрокоптеры самостоятельной сборки типоразмеров 5 и 7 дюймов.

1.3.4 Калибровочные измерения установки TAIGA-HiSCORE с использованием беспилотного летательного аппарата

Многороторные БПЛА, в частности коптеры с четырьмя или шестью моторами, были выбраны для проведения калибровочных измерений, так как позволяют достаточно гибко управлять их полётом и имеют возможность удерживать своё местоположение в пространстве.

Для испытания высоковольтного светодиодного блока (пункт 1.3.1) в условиях, максимально приближенных к реальным, был собран управляемый летательный аппарат — квадрокоптер. Во время испытания необходимо было выполнить проверку влияния работы светодиодного блока на системы управления/видеосвязи/приёмника координат квадрокоптера. Спецификация квадрокоптера самостоятельной сборки:

- карбоновая рама типоразмера 5 дюймов;
- пропеллеры, соответствующие раме, HQProp Freestyle Prop 5X4.3X3V2S (трёхлопастные, диаметр 5 дюймов);
- бесколлекторные моторы EMAX ECO 2306 1900KV (статор диаметром 23 мм и высотой 6 мм; 1900 оборотов/Вольт);
- полётный контроллер Matek F405-SE;
- регулятор оборотов Racerstar REV35 (на одной плате размещены четыре регулятора оборотов, для каждого двигателя свой регулятор; максимальный ток для одного регулятора 35 А на канал (в пике (длительностью до 10 с) 40 А); протокол связи с полётным контроллером Dshot600; диапазон поддерживаемых напряжений 3-6S (S — напряжение полностью заряженной ячейки в аккумуляторе — 4.2 В, т.е. 12.6 - 25.2 В); датчик тока для контроля израсходованной ёмкости аккумулятора);
- модуль компас+ГНСС (глобальная навигационная спутниковая система (GNSS)) Matek M8Q-5883 (точность определения координат по горизонтали 2.5 CEP (CEP — Circular Error Probable), в данном случае это означает, что в 50% случаев определения горизонтальных координат они попадают в круг радиуса 2.5 м). Данный модуль может принимать данные от следующих ГНСС-систем: GPS, GLONASS, SBAS, QZSS;

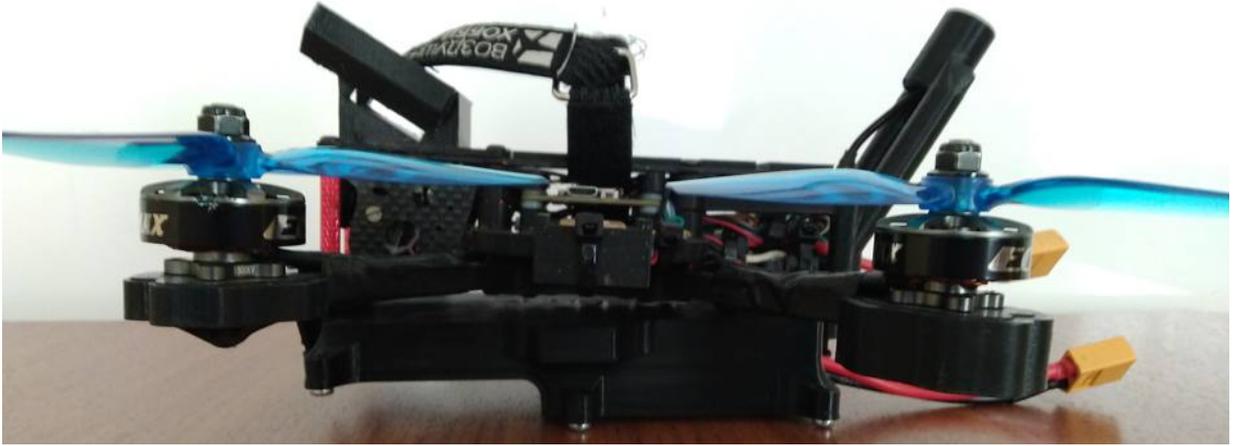


Рисунок 1.20 — Расположение светодиодного блока под квадрокоптером типоразмера 5 дюймов.

- модуль видеосвязи АКК FX2-ultimate mini работает в диапазоне 5.8 ГГц, имеет возможность выбора из сорока каналов для передачи; мощность сигнала, отдаваемая в эфир, также настраивается (25, 200, 600, 1200 мВт); протокол связи с полётным контроллером Smart Audio. На видеопередатчик устанавливалась антенна Foxeer 5.8G Micro Lollipop со всенаправленной диаграммой направленности излучения;
- FPV-камера для визуального контроля полёта;
- система управления летательным аппаратом — TBS CROSSFIRE;
- 6S (25.2 В) литий-полимерные аккумуляторы ёмкостью 1300 мА*ч, обладающие большой токоотдачей (до 130 А в пике).

На рис. 1.20 показано расположение светодиодного блока под собранным квадрокоптером типоразмера 5 дюймов.

Приёмником системы управления служил TBS CROSSFIRE NANO RX с антенной TBS CROSSFIRE IMMORTAL T V2, в качестве передатчика применялся TBS CROSSFIRE MICRO TX V2, оснащенный такой же антенной. Протокол связи передатчика с приёмником — CRSF, специально разработанный компанией TBS для реализации надёжной связи на больших расстояниях. Система может работать в двух диапазонах 868 и 915 МГц, переключение между которыми осуществляется через аппаратуру управления. Мощность излучения передатчика TBS CROSSFIRE MICRO TX V2 настраивается в пределах от 25 мВт до 1 Вт. Такая система управления может работать на расстояниях в десятки километров. В нашем случае, когда летательный аппарат используется для калибровки черенковских установок, нет необходимости в настолько больших расстояниях. Особенностью системы управления является то, что она

использует стабильный протокол связи CRSF и может осуществлять передачу на большие расстояния, что снижает вероятность возникновения проблем, связанных с управлением летательным аппаратом, при грамотном использовании.

Для визуального контроля полёта использовалась FPV (first person view)-камера. Изображение с камеры поступает на полётный контроллер. Контроллер «накладывает» на это изображение различные данные (например, текущие координаты, высоту, скорость перемещения относительно земли и т.д.), далее сигнал поступает на видеопередатчик, который транслирует эту информацию на выбранном канале. Соответственно, номера каналов на видеопередатчике и видеоприёмнике должны совпадать.

Для полётов в автоматических режимах (например, взлёт, полёт по заранее прописанным координатам в память полётного контроллера с последующей посадкой) использовалось бесплатное программное обеспечение с открытым исходным кодом ArduPilot: для полётного контроллера Matek F405-SE использовалась соответствующая прошивка для квадрокоптера с расположением моторов в виде буквы «X», для наземной станции применялась программа Mission Planner (ver. 1.3.79).

Программа Mission Planner обладает огромным функционалом, в ней производится вся необходимая первичная настройка летательного аппарата, а также внесение изменений в дальнейшем для улучшения лётных качеств. Также в этой программе можно записать некоторую последовательность действий, которую будет выполнять квадрокоптер; вести запись телеметрии, поступающей с летательного аппарата и т.д. Возможно получение данных в реальном времени, когда квадрокоптер находится в полёте, и, при необходимости, вносить коррективы в сам полёт. Благодаря протоколу MAVLink, осуществляется связь между наземной станцией и летательным аппаратом.

Полётный контроллер Matek F405-SE имеет возможность установки карты памяти формата microSD. На этот накопитель осуществляется запись данных телеметрии, также данные передаются на наземную станцию посредством MAVLink, где могут быть сохранены. Способ записи данных на накопитель, установленный в полётный контроллер, обладает преимуществом перед передачей данных «по воздуху», т.к. запись на носитель лишена проблем с помехами при радиосвязи, из-за чего часть данных может быть повреждена. Ещё одним преимуществом является увеличенная частота записи данных: так, на примере данных о полученных координатах, запись на носитель может

вестись с частотой 10 Hz, когда по радиотелеметрии данные обновляются с частотой 1 Гц. Подводя итог по способам записи телеметрии, запись на внешний носитель необходима, когда требуется информация в более полном объёме без потерь, а радиопередача данных полезна для контроля во время полёта и для организации самого полёта, т.к. протокол MAVLink является двухсторонним (получения данных от летательного аппарата и передача команд управления с наземной станции).

Приёмник Matek M8Q-5883 обладает точностью определения координат 2.5 СЕР. Для более точного определения (сантиметровой точности) координат аппарата возможно два способа: использование специализированных GNSS-приёмников с функцией RTK либо применение постобработки данных, записанных на внешний носитель на полётном контроллере.

В первом случае используются два приёмника GNSS-координат, работающих в режиме RTK (Real Time Kinematic). Один приёмник размещается неподвижно и выполняет функции «базовой станции», задача которой — определение поправок по определённым алгоритмам и передача их по отдельному каналу связи в реальном времени на приёмник, размещённый на летательном аппарате (в нашем случае). «Базовая станция» должна располагаться в точке с координатами, измеренными с достаточной точностью.

Во втором случае есть два независимых приёмника, у которых нет канала связи для передачи информации о вычисленных поправках. Здесь также есть «базовая станция» и перемещаемый приёмник. Оба приёмника ведут отдельно друг от друга набор данных, которые в последствии можно будет провести через специализированное программное обеспечение, например RTKlib, для того, чтобы добиться сантиметровой точности в определении координат летательного аппарата.

Для тестовых полётов была написана простая программа полёта, суть которой заключалась в том, что квадрокоптер в автоматическом режиме поднимается на высоту 500 м (относительно точки взлёта), на этой высоте он находится 2 минуты в режиме удержания позиции, после чего начинает снижаться и совершает посадку. Старт полёта по заранее написанной программе осуществляется оператором путём перевода летательного аппарата в режим «arm», в этот момент силами прошивки ArduPilot производится проверка множества показаний на предмет их соответствия (отсутствия скорости перемещения аппарата, нахождения напряжения аккумуляторной батареи в до-

пустимых пределах, получения данных от достаточного количества спутников для необходимой точности позиционирования и т.д.), после удачного прохождения предполётной проверки поступает разрешающий сигнал, запускающий моторы. После этого момента возможно либо ручное управление аппаратом, либо начать выполнение заранее записанного алгоритма действий.

К сожалению, типоразмер рамы (5 дюймов) и используемые в тестовых полётах аккумуляторные батареи не дают возможности нахождения аппарата с высоковольтным светодиодным драйвером на заданной высоте (500 м во время проведения калибровок) более 2 минут. Такое время нахождения на высоте 500 м является безопасным значением, благодаря которому есть некоторый запас по неизрасходованной ёмкости аккумуляторной батареи, которая может быть использована в нештатной ситуации, например, в момент удержания позиции, когда аппарат будет препятствовать смещающим его воздушным потокам.

По результатам тестовых полётов влияния высоковольтного светодиодного драйвера на системы летательного аппарата выявлено не было. Для увеличения полезного времени нахождения аппарата в воздухе было принято решение о сборке другого квадрокоптера с большей продолжительностью полёта. Для нового летательного аппарата была выбрана рама типоразмера 7 дюймов, моторы IFlight XING2 2506, двухлопастные пропеллеры Gemfan 7038 (7-дюймов). Вместо литий-полимерных аккумуляторов использовались два литий-ионных конфигурации 4S2P (две группы по 4 последовательно соединённых аккумуляторов объединялись параллельно). Аккумуляторы отличались между собой по используемым ячейкам: Molicel-18650-P26A и Molicel-21700-42A. Они отличаются по размерам и запасаемой ёмкости. Для первого типа ячеек итоговая ёмкость аккумуляторной батареи составила 5200 мА*ч, для второго — 8400 мА*ч. Эти модели литий-ионных ячеек были выбраны из-за несвойственных для обычных представителей этого типа ячеек эксплуатационных характеристик, позволяющих их применение при отрицательных температурах (до минус 40°C). Вся остальная электроника использовалась с предыдущего квадрокоптера меньшего размера. На рис.1.21 показаны квадрокоптеры двух типоразмеров. Применение другого размера рамы, моторов и пропеллеров позволило добиться длительности полёта в автоматических режимах 30 мин вместо 8 мин для квадрокоптера меньшего размера.

К наиболее интересным характеристикам коммерческого гексакоптера DJI Matrice 600 Pro можно отнести его габариты, вес, и время полёта. С учё-



Рисунок 1.21 — Высоковольтный светодиодный источник света, квадрокоптеры 7" и 5", соответственно.



Рисунок 1.22 — Многороторный беспилотный летательный аппарат DJI Matrice 600 Pro.

том устанавливаемых пропеллеров диаметром 21 дюйм габариты летательного аппарата составляют 1668 мм × 1518 мм × 727 мм; масса 9,5-10 кг (зависит от используемых аккумуляторов); полётное время без нагрузки составляет 32 мин, с грузом 6 кг — 16 мин.

Во время проведения калибровочных измерений по определению временных задержек между оптическими модулями важное значение имеет точность определения местоположения источника света. Эта задача является относительно простой в том случае, когда светодиодный источник света располагается неподвижно на некотором возвышении, например, как в Тункинском астрофизическом комплексе: на крыше одной из станций TAIGA-GRANDE. Когда калибровочный источник света располагается на беспилотном летательном ап-

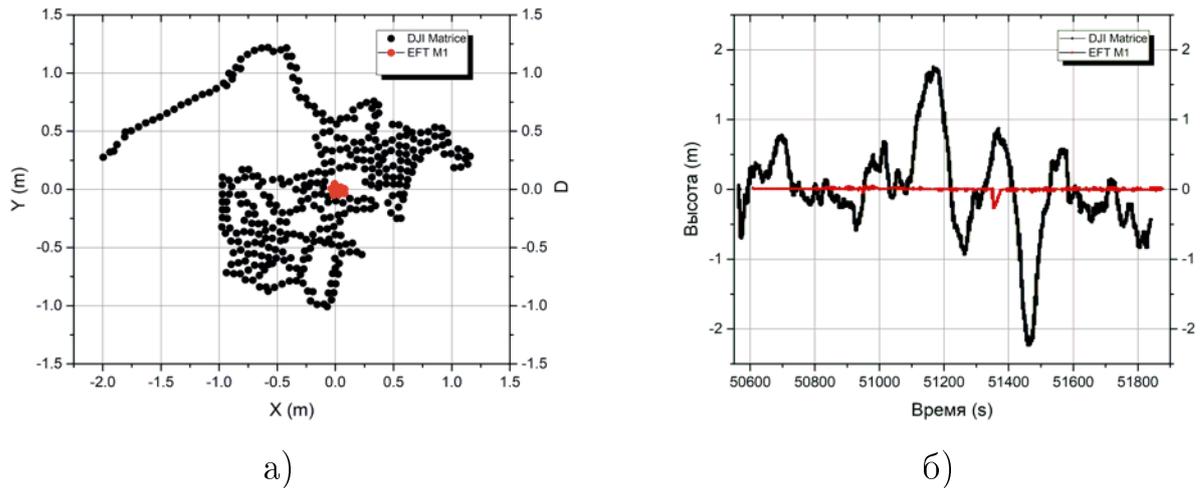


Рисунок 1.23 — Сравнение данных от штатной системы БПЛА и специализированной GNSS-системы EFT M1: а) в горизонтальной плоскости; б) в вертикальной плоскости (по высоте).

парате, то задача существенно усложняется, так как, находясь в воздухе, аппарат не может быть абсолютно неподвижен.

Перед использованием БПЛА для калибровочных измерений для установки TAIGA-HiSCORE было проведено сравнение между приёмниками координат: в одном случае использовалась только штатная система беспилотника (когда приёмник располагается только на корпусе БПЛА); в другом — применение дифференциальной GNSS-системы, состоящей из двух модулей, когда один располагается на БПЛА, другой — располагается на земле в точке с заранее известными координатами.

Стоит отметить, что DJI Matrice 600 Pro изначально не был оснащён специализированной GNSS-системой, хотя такие комплектации имеются у производителя (RTK-версии). Сравнение штатной системы БПЛА проводилось с такими GNSS-системами, как EFT M1 GNSS и Foga ONE.

На первом этапе было выполнено сравнение получаемых данных от штатной системы БПЛА и EFT M1, когда летательный аппарат находился неподвижно на земле. В этом случае приёмник EFT M1 был закреплён на корпусе беспилотника. Как видно из рис. 1.23а, точность определения координат в горизонтальной плоскости штатной системы гексакоптера на тот момент составила примерно ± 1.5 м, что является ожидаемым результатом для GNSS-приёмников общего назначения. Отклонения полученных координат от EFT M1 составили

несколько сантиметров. Подобная закономерность прослеживается и при определении высоты летательного аппарата (рис. 1.23б).

Соответственно, во время полёта ситуация с точностью определения координат сохраняется. Также во время испытаний было выявлено, что работа GNSS-приёмника EFT M1 влияет на магнитометр БПЛА, что может вызвать аварийную ситуацию. Для решения проблемы невозможности совместной работы EFT M1 и магнитометра БПЛА была выбрана другая GNSS-система Foga ONE, аналогичная по точности, но разработанная с учётом применения на беспилотном летательном аппарате.

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, в результате чего было получено распределение временных задержек (рис. 1.24) с $\sigma = 0.29$ нс. На рис. 1.24 изображен «суммарный» спектр по всем девяти группам станций. Данный спектр представляет собой отражение того факта, с какой точностью возможно определение относительных задержек в рамках одной засвечиваемых группы станций установки TAIGA-HiSCORE. $3\sigma = 0.87$

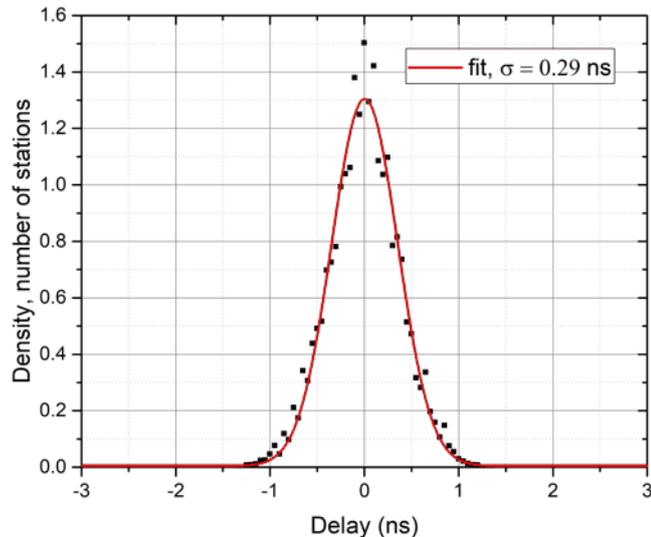


Рисунок 1.24 — Распределение временных задержек оптических станций установки TAIGA-HiSCORE.

нс — это максимальное отклонение между теоретической задержкой и задержкой, полученной при обработке данных от самих станций [93].

1.4 Узкоугольные атмосферные черенковские телескопы TAIGA-IACT

TAIGA-IACT (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope) — сеть атмосферных черенковских телескопов изображения [94]. На данный момент сеть состоит из трёх телескопов, ещё два подготавливаются для ввода в эксплуатацию. На рис. 1.25 показан первый телескоп. Отражатель сегментированный с общим диаметром 4.3 м выполнен из зеркал с возможностью индивидуальной настройки положения. В фокусе телескопа (фокусное расстояние составляет 4.75 м) закреплена камера. На рис. 1.26 изображена камера первого телескопа [95]. В камере расположены фотоумножители XP1911, для каждого фотоумножителя установлен конус Винстона. Для первого телескопа установки TAIGA-IACT количество используемых фотоумножителей равно 560, а для двух последующих 595. Фотоумножители группируются в кластеры по 28 штук в каждом. Угол обзора камеры составляет 9.6° . Размер фотоумножителя (диаметр стеклооболочки) должен быть не более 22 мм. Тогда эффективный (рабочий) размер

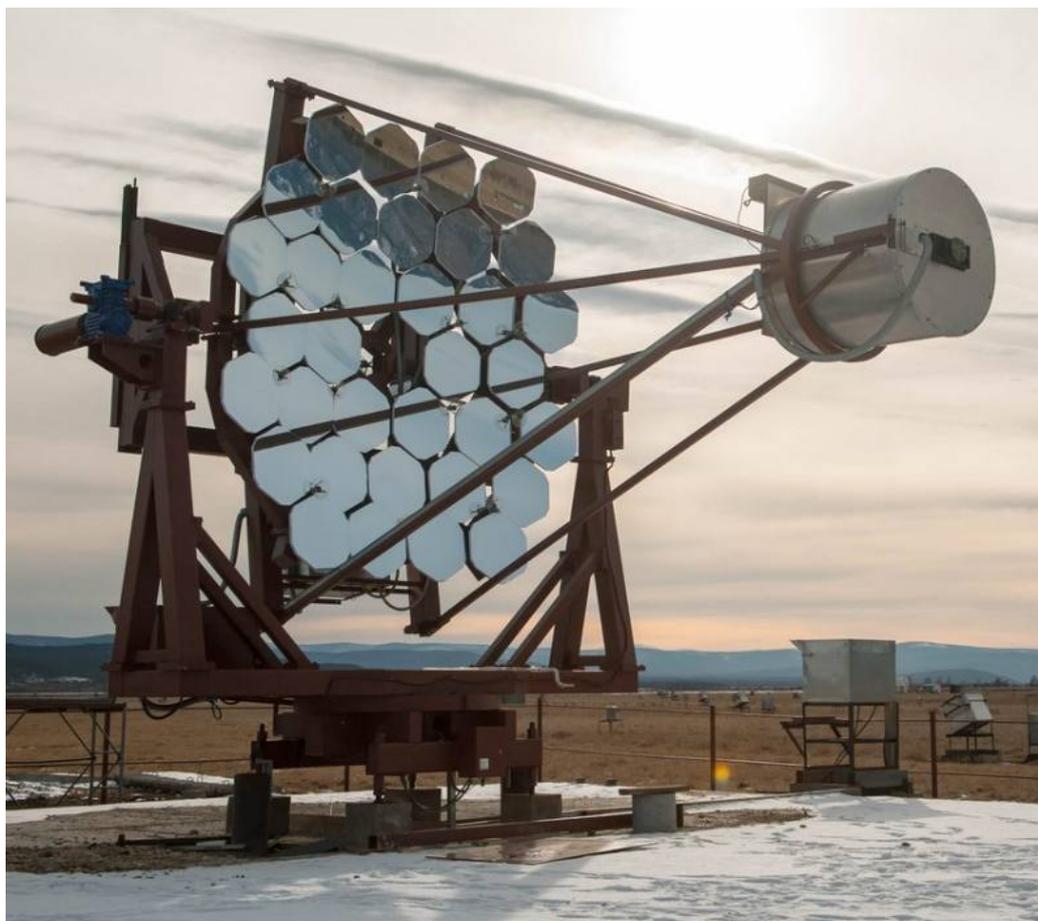


Рисунок 1.25 — Первый IACT в составе обсерватории TAIGA.

фотокатода должен быть не менее 15 мм в диаметре. Фотокатод фотоумножителя должен иметь высокую чувствительность в ближней ультрафиолетовой и синей областях спектра, т.е. фотокатод должен быть бищелочной. Фотоумножитель должен также иметь высокую линейность отклика. Желательно, чтобы разброс времени пролета фотоэлектронов при однофотоэлектронной засветке фотокатода фотоумножителей не превышал 2.5 нс (FWHM). Вероятность появления послеимпульсов не должна быть больше 5 % на один фотоэлектрон. Данный параметр особенно важен для телескопов IACT, поскольку влияет на его энергетический порог. В трех первых телескопах применяются фотоумножители XP1911В из закончившего свою работу эксперимента ZEUS [96; 97] в DESY. Фотоумножитель XP1911В, в целом, удовлетворяет требованиям, описанным выше.



Рисунок 1.26 — Камера изображения первого телескопа TAIGA-IACST.

1.4.1 Фотоумножитель XP1911B

Фотоумножитель XP1911B — малогабаритный фотоумножитель производства Photonis, Франция. На рис. 1.27 показаны фотографии фотоумножителей XP1911B. Стеклооболочка из боросиликатного стекла диаметром ~ 20 мм. Входное окно плоско-вогнутое, для обеспечения изохронности траекторий фотоэлектронов, т.е. уменьшения разброса времен пролета фотоэлектронов в катодной камере. Фотокатод бищелочной — K_2CsSb . Используется 10-диодная умножительная система с линейной фокусировкой. Материал динодов — медно-бериллиевый сплав $CuBe$, обеспечивающий высокую линейность отклика фотоумножителя. Высокой линейности способствует и рефлекторная конструкция анодного узла. Сплавные диноды приводят и к повышенной устойчивости фотоумножителя к высокому постоянному току, что важно для фотоумножителей, работающих в условиях светового фона ночного неба. Первый динод дополнительно активирован для получения хорошего однофотоэлектронного отклика.

Измерения зависимости квантовой эффективности от длины волны $QE(\lambda)$ проводились на специализированном измерительном стенде [98] с использованием реперных, хорошо калиброванных фотодиодов или фотоумножителей. На



Рисунок 1.27 — Фотоумножители XP1911В.

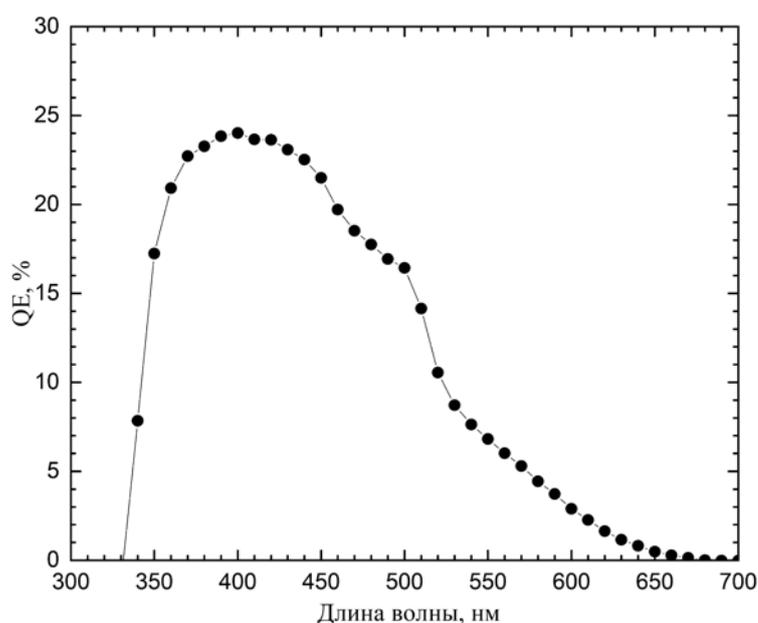


Рисунок 1.28 — Типичная зависимость квантовой эффективности фотокатода фотоумножителя XP1911В от длины волны.

рис. 1.28 показана зависимость $QE(\lambda)$, измеренная для одного из образцов фотоумножителя XP1911В и являющаяся типичной для фотоумножителей камер двух первых телескопов TAIGA-IACT.

Параметры фотоумножителя XP1911В исследовались на измерительном стенде, подробно описанном в работе [99]. В качестве источника наносекундных световых импульсов в данном стенде использовался разработанный нами одноканальный светодиодный модуль с быстродействующим формирователем импульсов запуска и светодиодом GNL3014BC, выполненный в стандарте NIM и представленный на рис. 1.29. Длительность световых импульсов составляла ~ 1

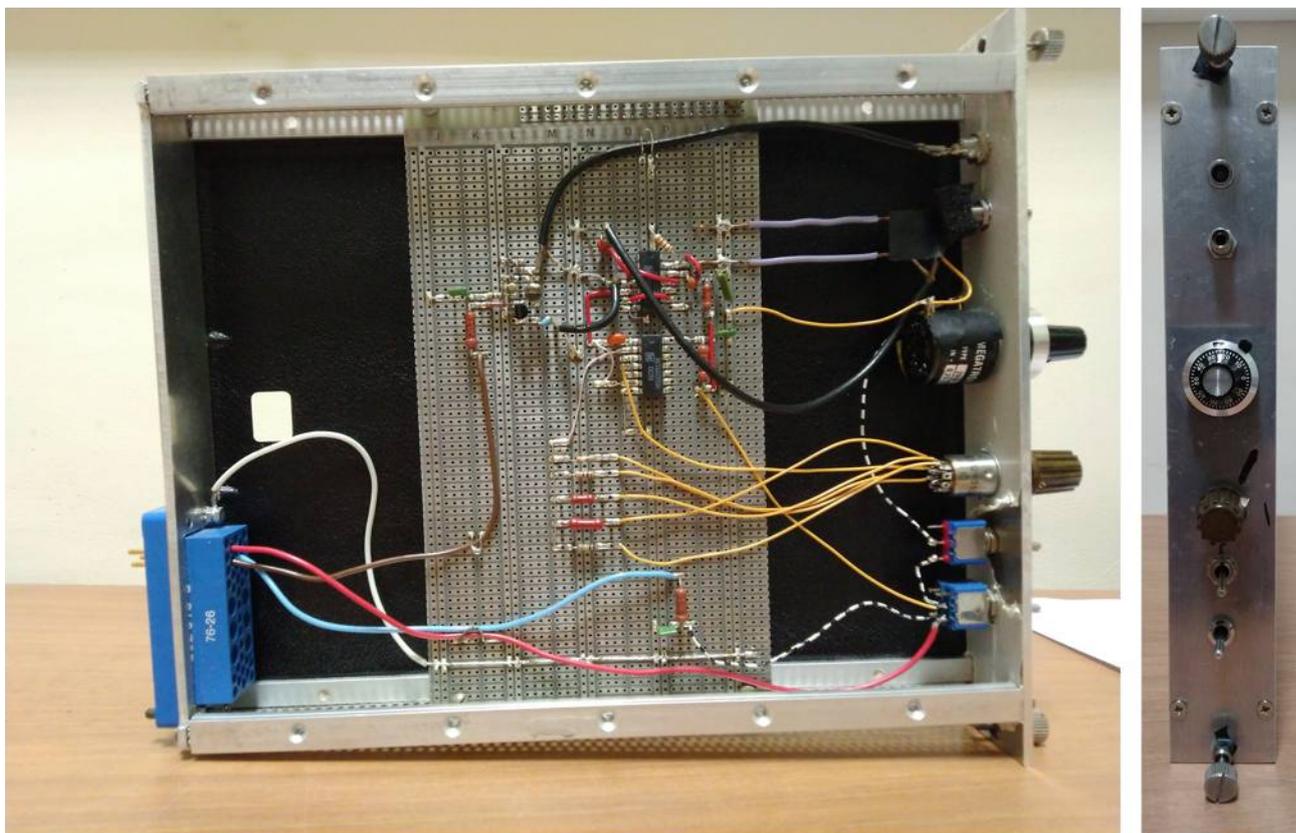


Рисунок 1.29 — Светодиодный модуль стандарта NIM, применяемый при тестировании фотоумножителей XP1911В.

нс (FWHM). На рис. 1.30 и рис. 1.31 показаны зарядовые распределения однофотоэлектронных и многофотоэлектронных импульсов. Однофотоэлектронное разрешение составляет $\sim 75\%$ (FWHM), а отношение пик/долина зарядового спектра однофотоэлектронных импульсов $P/V \approx 3$. В зарядовом распределении многофотоэлектронных импульсов наблюдаются пики, обусловленные вылетом с фотокатода одного, двух, трех и четырех фотоэлектронов. Скорость счета импульсов темнового тока при уровне дискриминации сигнала $0.25Q_{1pe}$, где Q_{1pe} — средний заряд однофотоэлектронных импульсов, не превышает $2 \times 10^3 \text{ c}^{-1}$ при температуре $23 \text{ }^\circ\text{C}$. Флуктуации скорости счета импульсов темнового тока довольно хорошо описываются Пуассоновским распределением, рис. 1.32.

На рис. 1.33 показано распределение времен пролета фотоэлектронов при однофотоэлектронной засветке фотокатода фотоумножителя XP1911В. Разброс времен пролета фотоэлектронов составляет 1.9 нс (FWHM). Вероятность появления предимпульсов не превышает 1 % на фотоэлектрон. Уровень задержанных импульсов $< 4 \%$. Вероятность появления послеимпульсов не превышает 2 % на фотоэлектрон при усилении фотоумножителя $G \sim 2 \times$

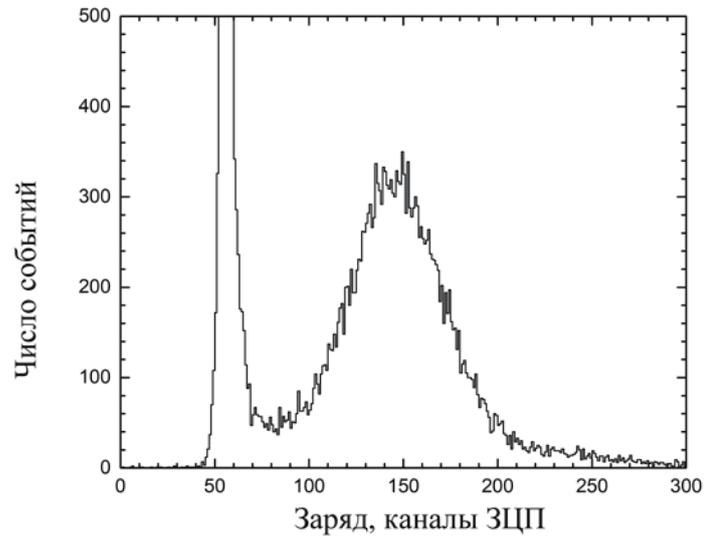


Рисунок 1.30 — Типичное зарядовое распределение однофотоэлектронных импульсов фотоумножителей XP1911В.

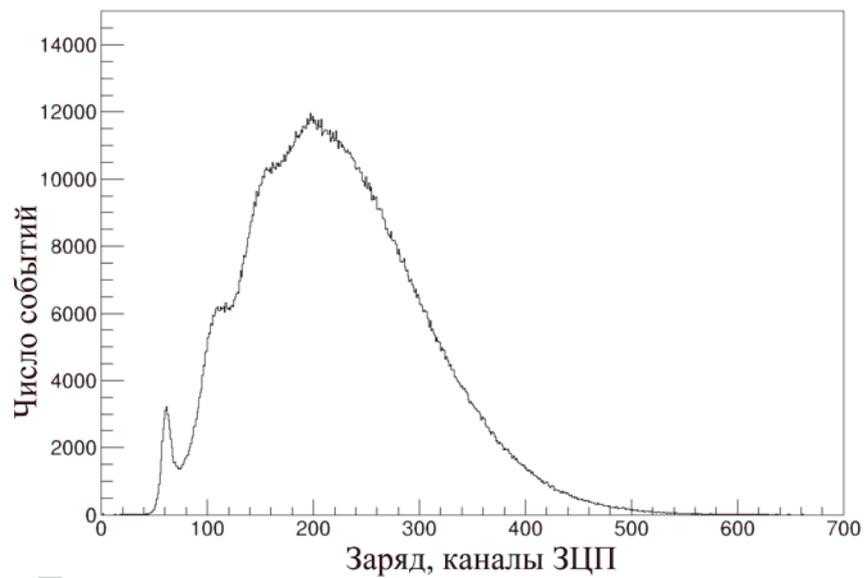


Рисунок 1.31 — Типичное зарядовое распределение многофотоэлектронных импульсов фотоумножителей XP1911В.

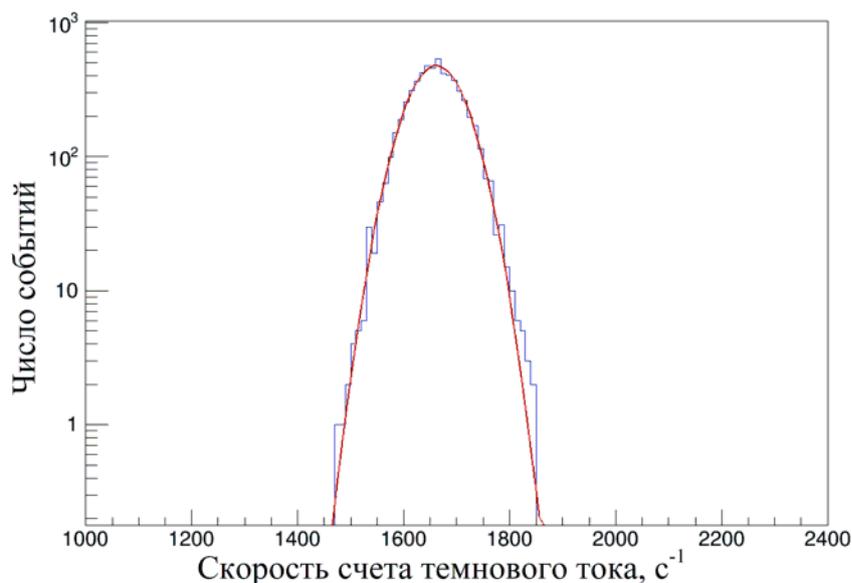


Рисунок 1.32 — Типичное распределение скорости счёта темного тока фотоумножителей XP1911B.

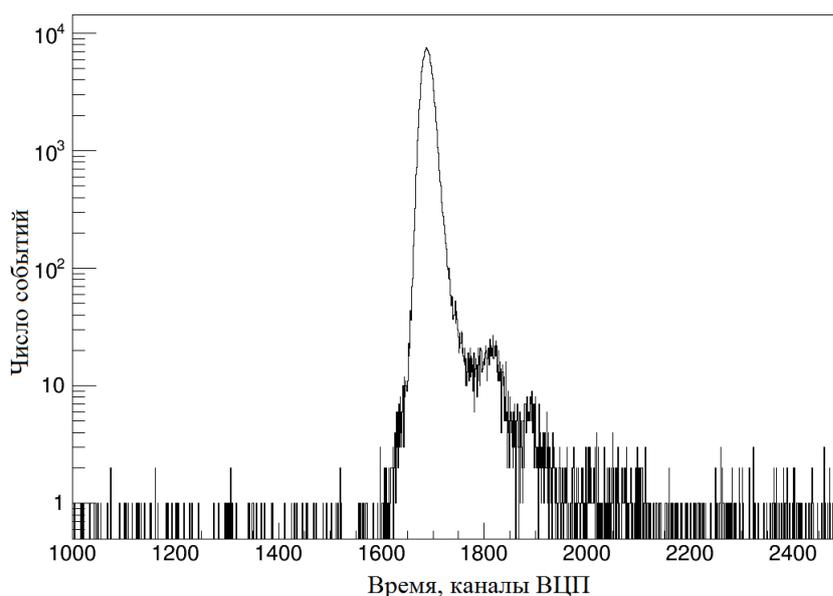


Рисунок 1.33 — Типичное распределение времен пролета фотоэлектронов при однофотоэлектронной засветке фото катода фотоумножителей XP1911B.

10^6 . Во временном распределении послеимпульсов фотоумножителя XP1911B, рис. 1.34, видны только пики, обусловленные обратным ионным током. Примечательно, что во временных распределениях послеимпульсов XP1911B не обнаружены аномально сильно задержанные послеимпульсы.

Результаты проведенных исследований параметров XP1911B позволяют сделать вывод, что данный фотоумножитель адекватно отвечает требованиям

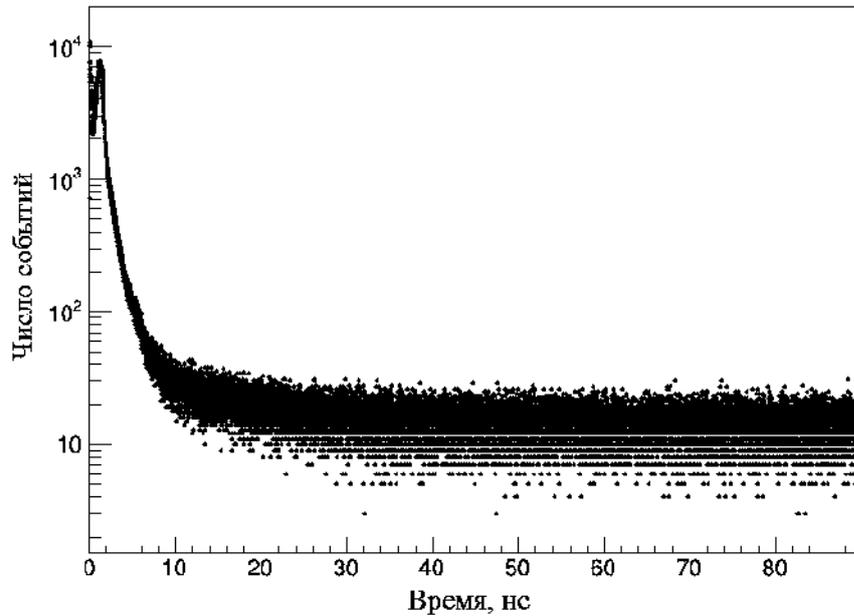


Рисунок 1.34 — Распределение времен задержек послеимпульсов фотоумножителя XR1911В из камеры атмосферного черенковского телескопа TAIGA-IACT. атмосферных черенковских телескопов изображения TAIGA-IACT.

Заключение к Главе 1

1. Разработаны и созданы калибровочные системы для широкоугольных черенковских установок эксперимента TAIGA.
2. С использованием разработанных наземных калибровочных систем впервые для эксперимента TAIGA проведены измерения временного разрешения черенковских установок TAIGA (параметра T_0 и/или систематических временных сдвигов оптических станций)
3. Впервые в мире разработана и создана калибровочная система широкоугольных черенковских установок эксперимента TAIGA с использованием беспилотных летательных аппаратов.
4. С помощью разработанного автором наносекундного источника света исследованы основные параметры малогабаритных фотоумножителей XR1911В используемых в камерах атмосферных черенковских телескопах изображения TAIGA-IACT. Показано, что параметры фотоумножителя XR1911В отвечают, в целом, требованиям, предъявляемым к фотоумножителям для использования в составе камер атмосферных черенковских телескопов изображения TAIGA-IACT.

Глава 2. Калибровочная система для малогабаритных фотоумножителей нейтринного эксперимента JUNO

2.1 Нейтринный эксперимент JUNO

Нейтринная физика на протяжении полувека находится на самом переднем крае развития науки. Открытие осцилляций нейтрино окончательно доказало, что нейтрино имеет ненулевую массу покоя. Измерены все углы смешивания нейтрино. Подлинным триумфом нейтринной физики стало измерение угла смешивания θ_{13} в экспериментах Double Chooz [100], Daya Bay [101] и RENO [102]. В настоящее время ведутся активные поиски CP-нарушающей фазы матрицы смешивания нейтрино. Однако, весь набор современных экспериментальных данных не дает ответа на вопрос об иерархии масс нейтрино. Действительно, существующие данные по углам смешивания (θ_{12} , θ_{23} , θ_{13}) и квадратам разности масс (Δm_{12}^2 , Δm_{23}^2 , Δm_{13}^2) не противоречат ни прямой иерархии масс нейтрино ($m_1 < m_2 < m_3$), ни обратной иерархии ($m_3 < m_1 < m_2$), например, смотрите обзор в [103].



Рисунок 2.1 — Местоположение эксперимента JUNO [104].

Эксперимент JUNO (Jiangmen Underground Neutrino Observatory) [104; 105] — многоцелевой нейтринный эксперимент, основной задачей которого является именно определение иерархии масс нейтрино, используя подземный жидко-сцинтилляционный детектор. Детектор находится на равном удалении ~ 53 км (рис. 2.1) от двух АЭС (Тайшань и Янцзян) с общей мощностью 26.6 ГВт, расположенных на побережье Южно-Китайского моря в Китае. Над экспериментальным залом, протяженностью более 50 м, находятся ~ 650 м горных пород.

Расстояние ~ 53 км между детектором JUNO и реакторными комплексами соответствует первому осцилляционному максимуму солнечных нейтрино, рис. 2.2 [106]. Глубина осцилляционного максимума определяется величиной угла смешивания θ_{12} а положение максимума по шкале L/E [км/МэВ] зависит от величины разности квадратов масс Δm_{21}^2 . Как видно из рисунка зависимость вероятности выживания антинейтрино от L/E имеет сложный характер из-за наложений «солнечных» («медленных») осцилляций, определяемых параметрами θ_{12} и Δm_{21}^2 , и «реакторных» («быстрых») осцилляций, определяемых параметрами θ_{13} и Δm_{31}^2 . Вид энергетического спектра реакторных антинейтрино в центральном детекторе JUNO зависит от иерархии масс нейтрино, рис. 2.3 [15]. На рисунке синим цветом обозначен спектр для нормальной иерархии масс нейтрино, а красным цветом — для обратной иерархии. По различию этих спектров и делается вывод о той или иной иерархии масс нейтрино. Для четкого разделения спектров необходимо энергетическое разрешение центрального детектора JUNO не хуже 3% на 1 МэВ [15; 107].

За 6 лет детектирования потока реакторных антинейтрино от АЭС станет возможным определить иерархию масс нейтрино с точностью 3-4 σ . В тоже время, благодаря высокому энергетическому разрешению ($3\%/\sqrt{E(\text{MeV})}$) и массе жидкого сцинтиллятора в 20 кт, можно добиться точности определения параметров осцилляций ($\sin^2 \theta_{12}$, Δm_{21}^2 , $|\Delta m_{ee}^2|$) лучше 1 %. Детектор может наблюдать нейтрино от взрыва сверхновых, геонейтрино, атмосферные и солнечные нейтрино. Также детектор чувствителен к новой физике вне рамок Стандартной Модели: стерильные нейтрино, нейтрино от аннигиляции тёмной материи, распад протона, а также нестандартные сценарии нейтринных взаимодействий и нарушений Лоренц/СРТ-инвариантности.

Система детектора JUNO состоит из детектора с 20 кт жидкого сцинтиллятора, водного черенковского детектора, внутри которого размещена сфера

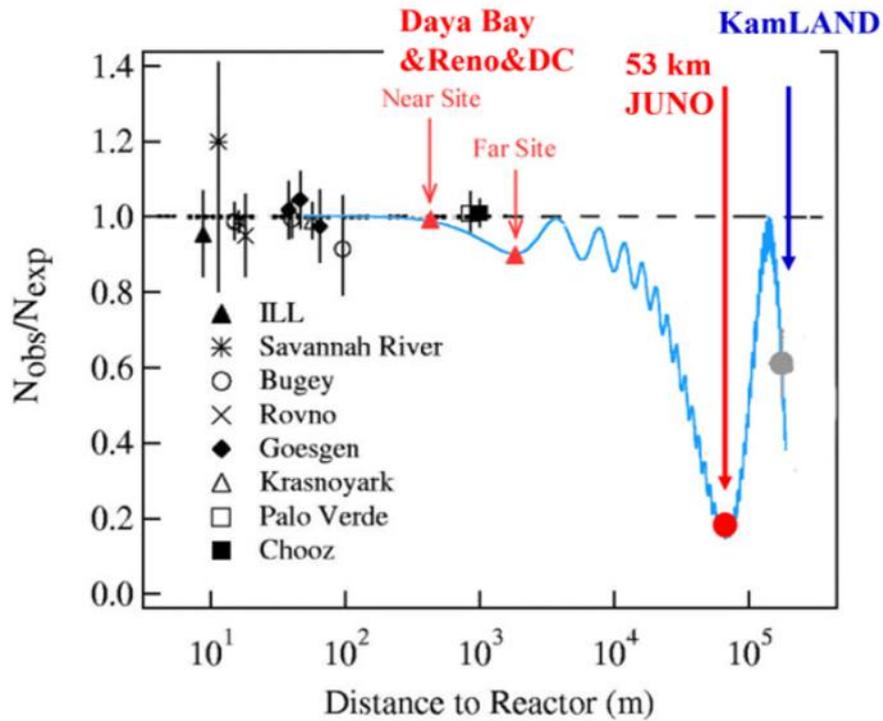


Рисунок 2.2 — Зависимость вероятности выживания реакторных антинейтрино от расстояния до реактора [106].

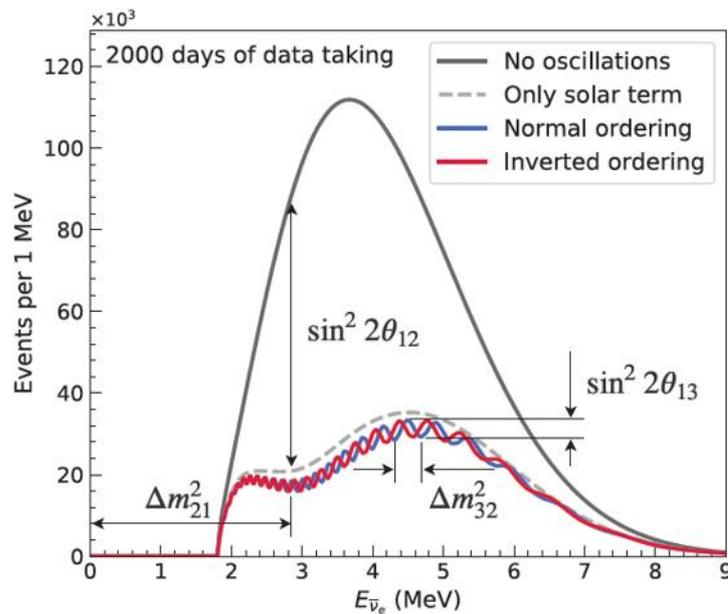


Рисунок 2.3 — Энергетические спектры реакторных нейтрино в эксперименте JUNO [15].

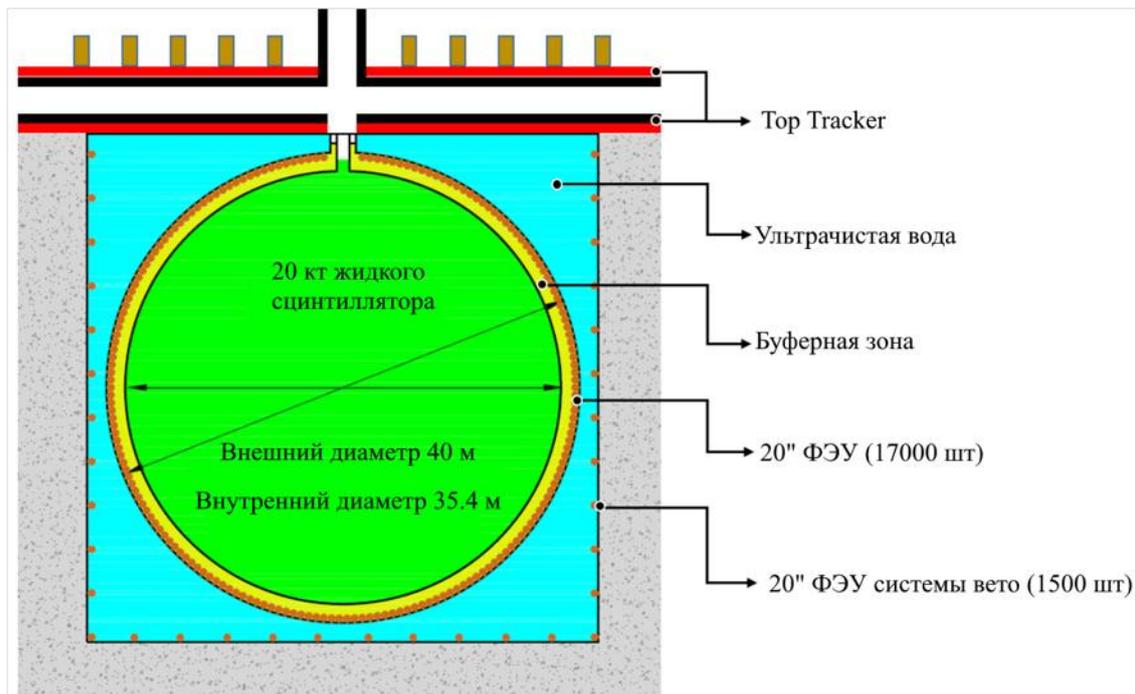


Рисунок 2.4 — Схема детектора JUNO.

со сцинтиллятором, и массива пластиковых сцинтилляторов, размещенных над водным детектором.

20 кт жидкого сцинтиллятора находятся в акриловой сфере диаметром 35.4 м (рис. 2.4). Основная поддерживающая конструкция состоит из нержавеющей сферы и своими несущими крепится к акриловой ёмкости посредством 590 стоек. Жидкий сцинтиллятор просматривается 17612 ФЭУ диаметром 20 дюймов (LRMT) и 25600 ФЭУ диаметром 3 дюйма (SPMT), которые установлены на внутренней поверхности сферы из нержавеющей стали. Для черенковского детектора используются 2400 20-ти дюймовых ФЭУ. Для 20-ти дюймовых ФЭУ отношение площади фотокатода к площади акриловой сферы составляет 75.2 %, для 3 дюймовых — 2.7 %. Средняя эффективность детектирования фотонов для LRMT составляет 29.1 %, для SPMT — >24 %. Для LRMT устанавливается специальная защита на случай взрыва ФЭУ. Акриловая сфера с жидким сцинтиллятором помещена в цилиндрический резервуар (диаметром 43.5 м, высотой 44 м), в результате чего получается буферная зона толщиной 1.42 м между акриловой сферой и ФЭУ, защищая жидкий сцинтиллятор от радиоактивности стекла ФЭУ. Буферная зона оптически отделена от черенковского детектора. Благодаря размерам водного резервуара, образуется достаточная буферная зона для защиты жидкого сцинтиллятора от радиоактивности окружающей горной породы. Для компенсации магнитного поля Земли на стальной конструкции, окружающей сферу, установлены катушки Гельмгольца.

Состав жидкого сцинтиллятора: основа — линейный алкилбензол (LAB), сцинтиллирующая добавка — 2,5-дифенилоксазол (PPO) (2 г/л), спектросмещающая добавка — 1,4-Бис(2-метилстирил)бензол (bis-MSB) с концентрацией 2 мг/л [108; 109]. Исследования показали, что длина поглощения для данного сцинтиллятора достигает >20 м. По результатам моделирования световыход с учётом эффективности детектирования и других параметров детектора равен 1345 фотоэлектронов на 1 МэВ. Ожидаемое значение радиочистоты жидкого сцинтиллятора составляет 10^{-17} г/г для U/Th/K.

Над водным резервуаром находятся 62 пластины пластикового сцинтиллятора размерами 6.7×6.7 м², представляющие собой мюонный трекер (Top Tracker) [110]. Пластины уложены в три слоя, покрывая собой более 25 % верхней части водного резервуара. Ранее эти сцинтилляционные детекторы применялись в эксперименте OPERA [111].

2.2 Система малогабаритных фотоумножителей SPMT эксперимента JUNO

В JUNO используются 25600 фотоумножителей XP72B22 (HZC Photonics, Хайнань, Китай) с полусферическим фотокатодом диаметром 3 дюйма [112–114]. Их располагают между 20-ти дюймовыми фотоумножителями, как показано на рис. 2.5. Система SPMT служит для работы в режиме счета фотонов, позволяя набирать статистику для последующего применения, уменьшая вклад систематической погрешности в энергетическом отклике системы LPMT. Так как 3-дюймовые фотоумножители будут собирать существенно меньше света, чем 20-дюймовые, то применение системы SPMT позволит расширить динамический диапазон детектора в тех случаях, когда при событиях с высокой энергией возможны эффекты нелинейности и насыщения в 20-дюймовых ФЭУ.

Фотоумножители организованы в кластеры, каждый кластер включает в себя 128 фотоумножителей, которые подключены к своему герметичному подводному блоку электроники. Блок с электроникой включает в себя источники высоковольтного напряжения питания, плату считывания и оцифровки сигнала, плату управления.



Рисунок 2.5 — Взаимное расположение 20- и 3-дюймовых ФЭУ.

В качестве основы был выбран фотоумножитель XR72B20 производства компании HZC Photonics. Была проведена глубокая модернизация этого фотоумножителя (улучшение электронной оптики за счет оптимизации формы стеклооболочки, фокусирующих электродов между фотокатодом и первым динодом, между первым и вторым динодами (схема делителя приведена на рис. 2.8), отбор материалов с меньшим уровнем радиоактивности и т.д.). В результате такой модернизации получился фотоумножитель XR72B22 (рис. 2.6). На рис. 2.7а и 2.7б показаны эскиз стеклооболочки и электронная оптика фотоумножителя соответственно. Как видно из рис. 2.7б, 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 XR72B22 непрерывно велась работа по отбору, тестированию и контролю за параметрами фотоумножителей. Контроль осуществлялся по 15-и параметрам-требованиям, разбитым по приоритетам на 5 классов — А, В, С, D.

Требования класса А:

- диаметр стеклооболочки фотоумножителя — в пределах 78-82 мм;
- квантовая эффективность фотокатода (QE) на длине волны 420 нм — не менее 22 %;

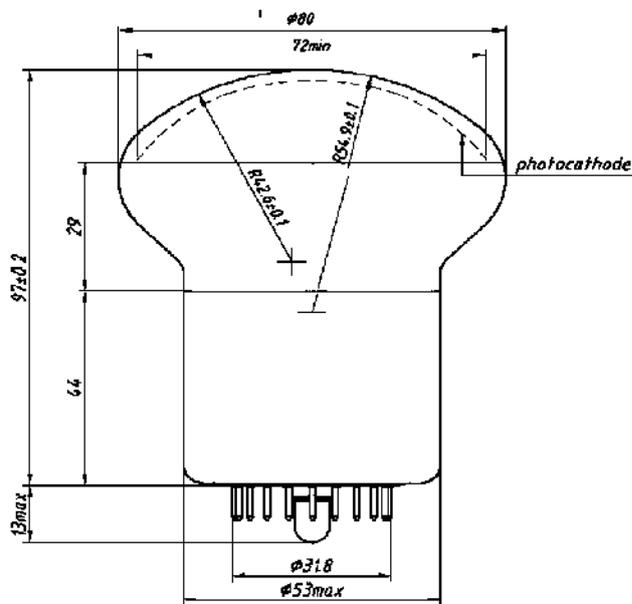


а)

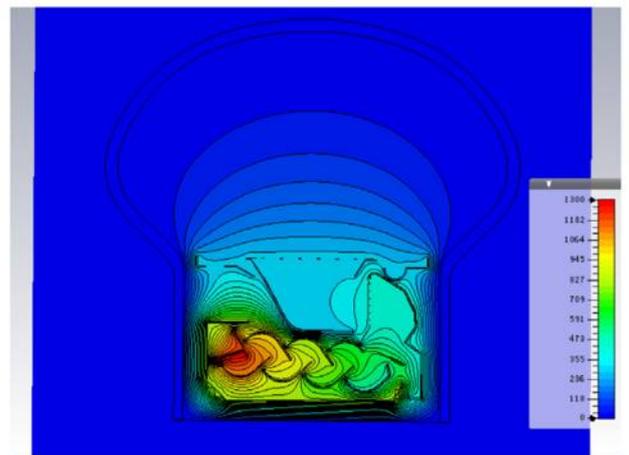


б)

Рисунок 2.6 — Фотоумножитель ХР72В22: а) без гидроизоляции; б) с гидроизоляцией.



а)



б)

Рисунок 2.7 — Фотоумножитель ХР72В22 [113]: а) эскиз стеклооболочки фотоумножителя ХР72В22 (размеры указаны в мм); б) электронная оптика фотоумножителя ХР72В22.

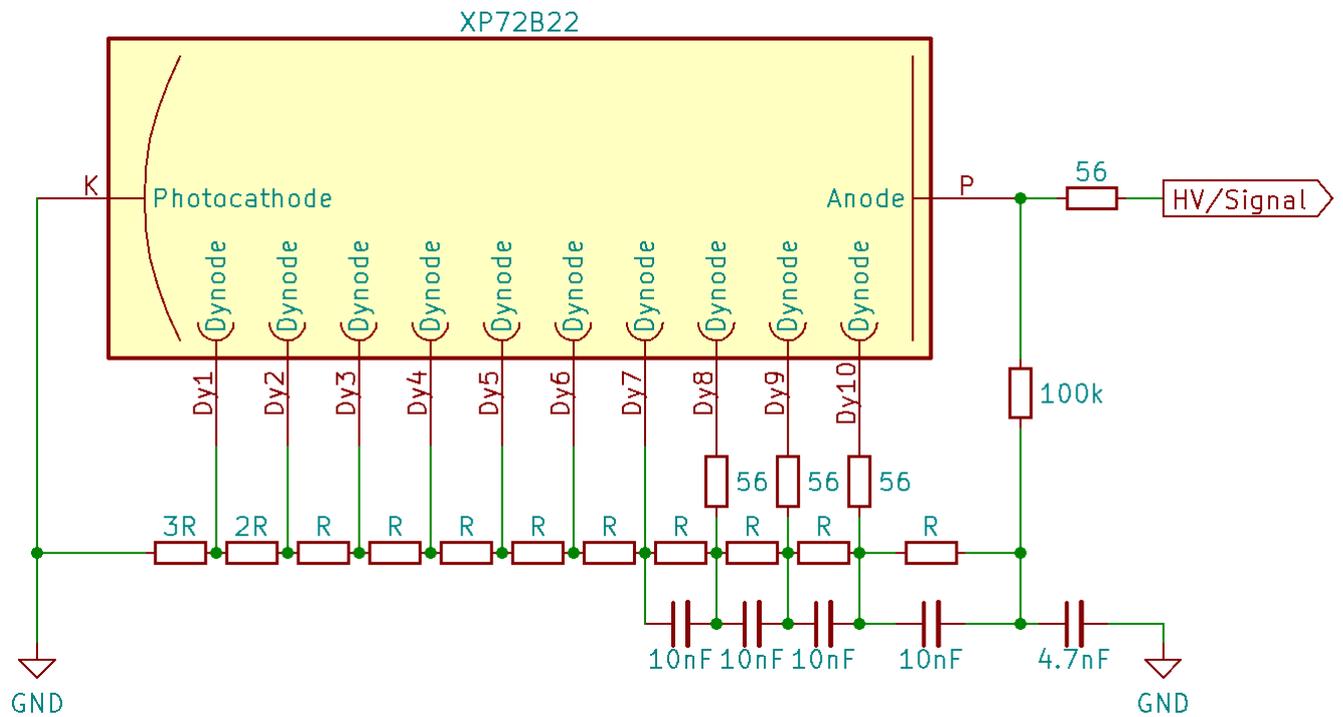


Рисунок 2.8 — Принципиальная схема делителя для XP72B22 ($R = 15 \text{ МОм}$).

- величина высоковольтного напряжения питания, соответствующая усилению 3×10^6 — не менее 900 В, не более 1300 В;
- разрешение зарядового спектра однофотоэлектронных импульсов — не менее 45 %;
- отношение пик/долина зарядового спектра однофотоэлектронных импульсов — не менее 2;
- скорость счёта импульсов темнового тока при уровне дискриминации сигналов, соответствующем $0.25Q_{1pe}$ — не более $1.8 \times 10^3 \text{ с}^{-1}$;
- скорость счёта импульсов темнового тока при уровне дискриминации сигналов, соответствующем $3.0Q_{1pe}$ — не более 30 с^{-1} .

Q_{1pe} — средний заряд однофотоэлектронных импульсов.

Требования класса В:

- разброс времени пролета фотоэлектронов при однофотоэлектронной засветке фотокатода — не более 2.1 нс (σ);
- уровень предимпульсов — не более 5 %;
- уровень послеимпульсов — не более 15 %;
- неоднородность чувствительности фотокатода — не более 11 %;
- рабочий эффективный размер фотокатода — более 74 мм.

Требования класса С:

- квантовая эффективность фотокатода на длине волны 320 нм — более 5 %;
- квантовая эффективность фотокатода на длине волны 550 нм — более 5 %.

Требования класса D:

- время жизни — более 200 нА × год.

Всего протестировано в общей сложности 26 тысяч фотоумножителей XR72B22. По результатам этого массового тестирования по всем параметрам-требованиям было отсеяно только 15 образцов фотоумножителей. При этом, большая часть, 11 штук из этих 15 образцов, была забракована из-за повышенного уровня послеимпульсов. Только по одному образцу не были пройдены тестирования по квантовой эффективности на длине волны 420 нм, по рабочему напряжению, по скорости счета импульсов темнового тока выше 0.25 фэ и 3 фэ.

2.3 Быстродействующий светодиодный модуль

На рис. 2.9 представлена схема быстродействующего светодиодного драйвера [115] основанного на комплементарной паре транзисторов BFT92 и BFR92. Напряжение питания для данной схемы составляет от 0 до минус 24 В. В качестве запускающих импульсов используются прямоугольные импульсы TTL-уровня.

Для схемы на рис. 2.9 была разработана печатная плата (размерами 30.48 мм × 30.48 мм, рис. 2.10). В дальнейшем эта плата быстродействующего светодиодного драйвера использовалась в различных светодиодных источниках света, представленных в данной работе: одноканальном на базе платы ARDUINO NANO, 4-канальном под управлением микроконтроллера STM32F401CCU6, 2-канальном на основе МК Cypress CY8C4245AXI-483, одно- либо двухканальном модуле, выполненном в формфакторе функционального модуля (шириной 1U) для крейтов стандарта NIM.

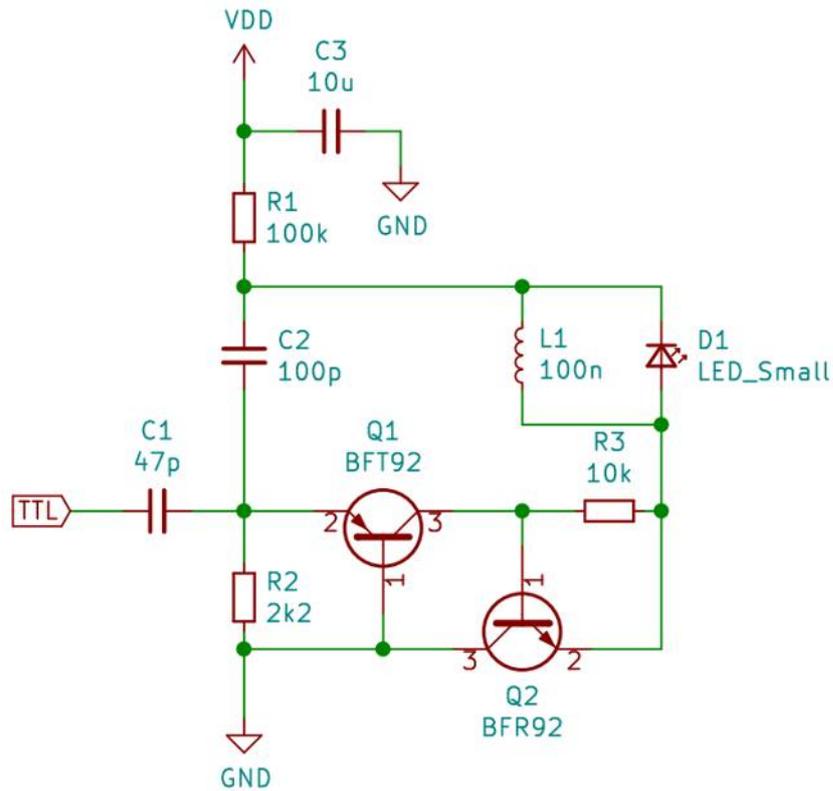


Рисунок 2.9 — Быстродействующий светодиодный драйвер.

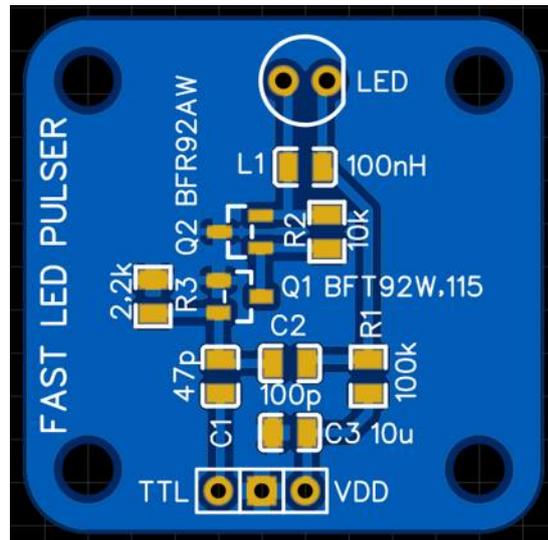


Рисунок 2.10 — Печатная плата для быстродействующего светодиодного драйвера.

2.4 Калибровочная система для массового тестирования SPMT эксперимента JUNO

Для массового тестирования ФЭУ, применяемых в эксперименте JUNO, была разработана калибровочная система: светодиодный блок (выполненный

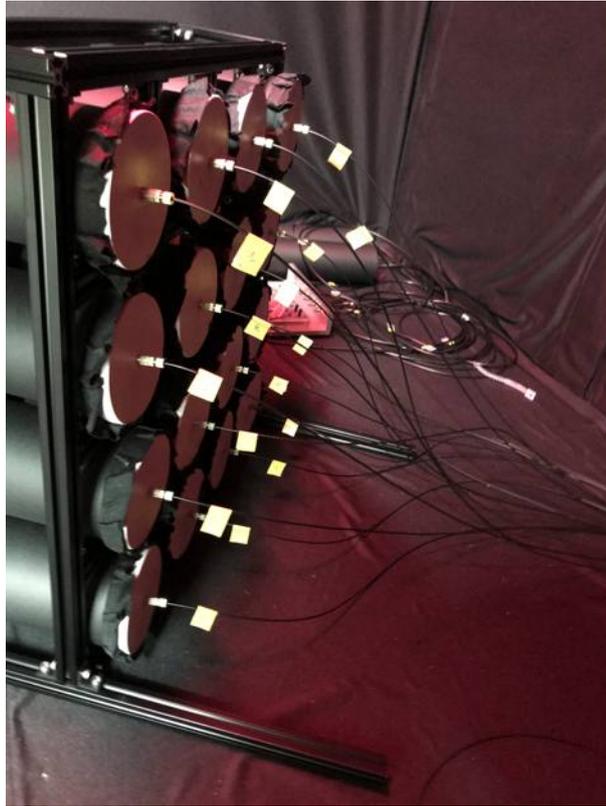


Рисунок 2.11 — Стенд для одновременного тестирования 16-ти ФЭУ.

в формфакторе функционального блока (шириной 1U) для крейтов стандарта NIM) и оптический разветвитель. Оптический разветвитель позволяет с помощью диффузного рассеивателя распределить световой сигнал равномерно на 16 каналов. Таким образом, можно одновременно производить засветку 16-и ФЭУ одним светодиодным источником света. На рис. 2.11 показана фотография части установки по тестированию фотоумножителей системы SPMT в Национальном университете Тайваня в г. Тайбэй.

Для светодиодного блока в качестве генератора запускающих импульсов использовалась схема мультивибратора на логических элементах 2И-НЕ (блок-схема на рис. 2.12). В данном случае регулировка частоты следования импульсов реализована через подключение резисторов R_1 различных номиналов.

На рис. 2.13 представлена принципиальная схема устройства светодиодного блока. Под обозначением SW1 — галетный переключатель, которым регулируется частота выходных импульсов от микросхемы IN74AC00N. Микросхема содержит 4 логических элемента 2И-НЕ, логические уровни стандарта TTL. Частота следования этих импульсов настраивается ступенчато в диапазоне от 30 Гц до 11 кГц. Все необходимые рабочие напряжения светодиодный блок получает от крейта стандарта NIM посредством соответствующей разь-

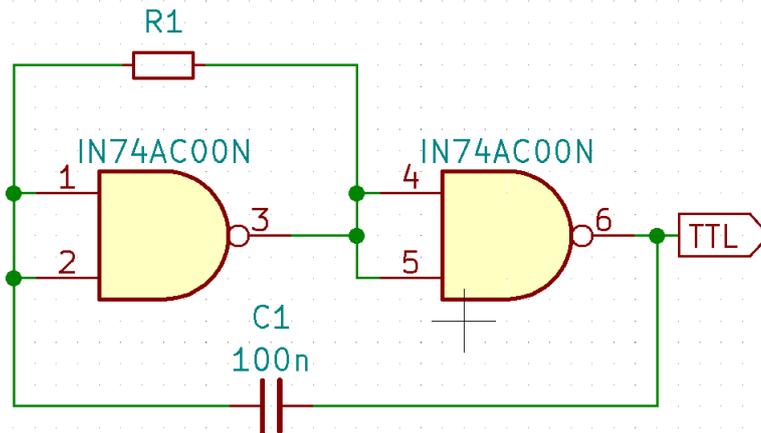


Рисунок 2.12 — Генератор запускающих импульсов.

ёмной колодки. Длительность генерируемых импульсов задаётся номиналами резисторов ($R1 - R5$) и конденсатором $C3$. Далее сформированный сигнал удваивается и поступает на преобразователь логических уровней TTL-NIM, построенный на транзисторах $Q1$ и $Q3$, и на отдельную плату с быстродействующим светодиодным драйвером. На преобразователе TTL-NIM формируется сигнал стандарта NIM, выведенный на коннектор LEMO-00b на переднюю панель светодиодного блока. Этот сигнал используется для синхронизации светодиодного модуля с другим измерительным оборудованием.

На рисунке 2.14 отображена компьютерная модель оптического разветвителя в разрезе (размеры указаны в миллиметрах). Схема применения оптического разветвителя представлена на рис. 2.15 на примере использования с 16 ФЭУ. Условно конструкцию можно разделить на две части: верхняя часть, идущая от светодиодного блока, (оранжевого цвета) с одним отверстием для оптического волокна, нижняя часть (бирюзового цвета) служит для крепления 17 оптических волокон (16 основных + 1 контрольное). Между этими частями располагается цилиндрический диффузный рассеиватель (отмечен синим цветом) толщиной 5 мм и диаметром 16 мм. Сборка оптического разветвителя осуществляется через трубку (зелёный цвет) посредством резьбового соединения, в результате чего, диффузный рассеиватель фиксируется неподвижно верхней и нижней частями. Для фиксации концов оптических волокон в отверстиях применяется прозрачная эпоксидная смола, после чего на торцах верхней и нижней частей, прилегающих к рассеивателю, выравниваются и полируются плоскости. Конструкция оптического разветвителя выполнена из полиэтилентерефталатгликоля (PET-G) на 3D-принтере.

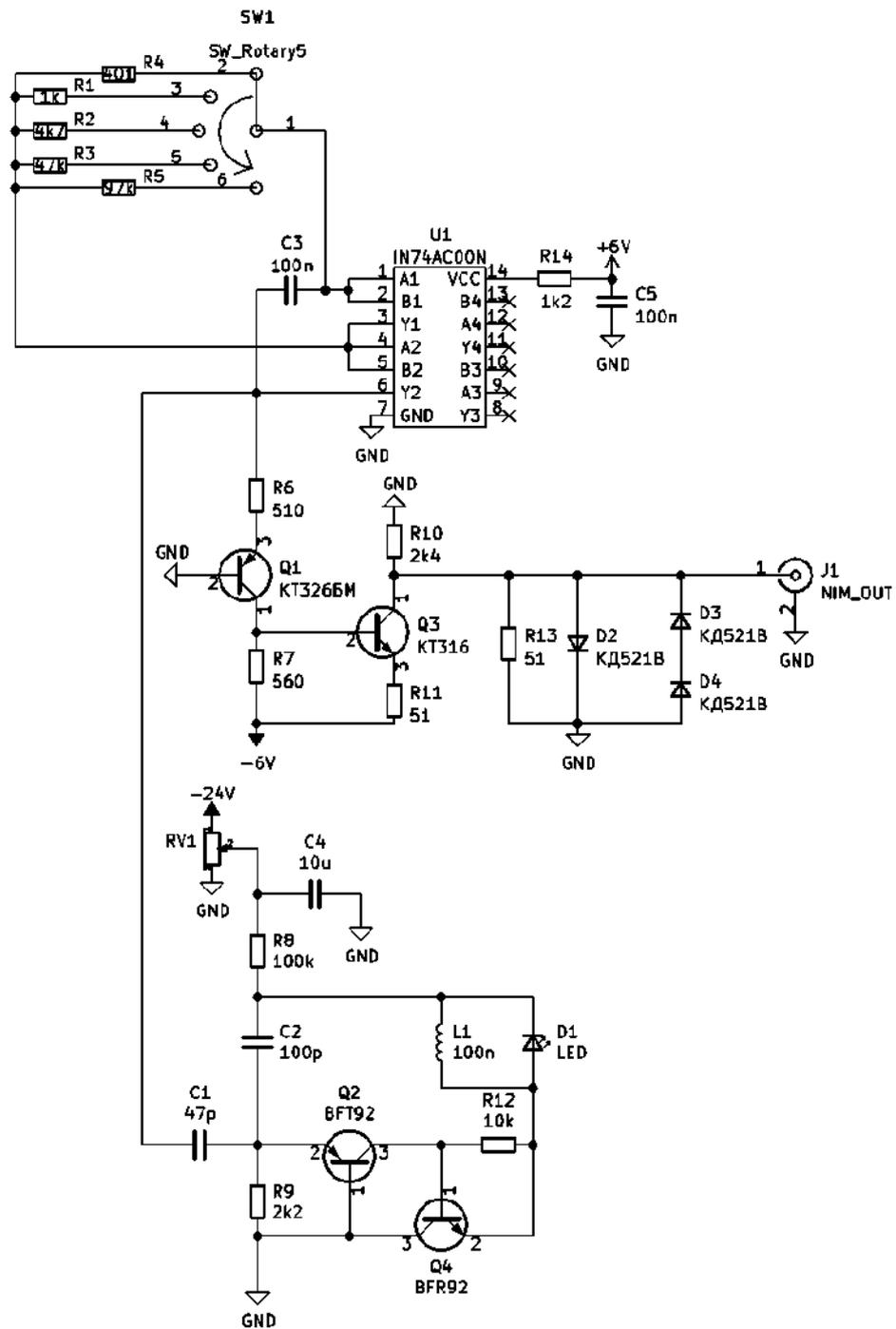


Рисунок 2.13 — Принципиальная схема светодиодного блока для крейтов стандарта NIM.

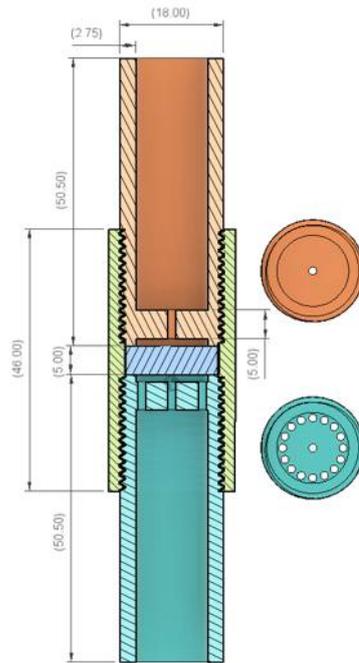


Рисунок 2.14 — Оптический разветвитель. 3D-модель в разрезе.

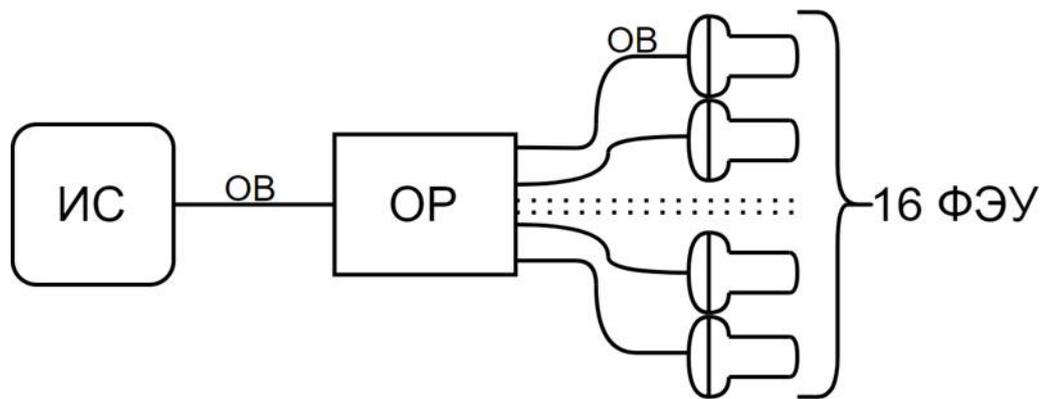


Рисунок 2.15 — Схема применения оптического разветвителя. ИС — источник света; ОВ — оптоволокно; ОР — оптический разветвитель.

На рис 2.16 представлены изображения двух основных составных частей оптического разветвителя после закрепления оптических волокон с помощью эпоксидной смолы и полировки торцов, а на рис. 2.17 показан оптоволоконный разветвитель в сборе.

На рисунке 2.18 представлен готовый светодиодный блок. 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). Разработанная система активно использовалась в исследованиях параметров быстродействующих фотоумножителей с микроканальными пластинами FPMT [116].



а)



б)

Рисунок 2.16 — Составные части оптического разветвителя: а) часть оптического разветвителя, идущая к ФЭУ; б) часть оптического разветвителя, подключаемая к светодиодному модулю.



Рисунок 2.17 — Оптоволоконный разветвитель в сборе.

На гистограммах, представленных на рис. 2.19 — 2.24, показаны результаты массового тестирования и отбора фотоумножителей XP72B22. Среднее значение квантовой эффективности на длине волны 420 нм составляет $\sim 25\%$, причем, следует отметить, что гистограмма довольно узкая с небольшим хвостом в области меньших значений квантовой эффективности, рис. 2.19. При

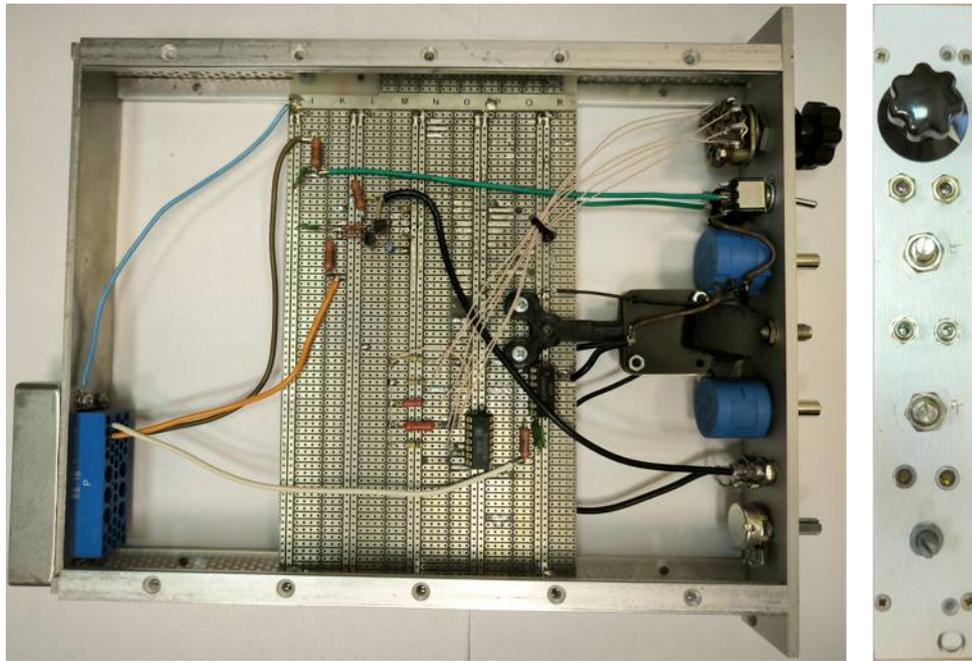


Рисунок 2.18 — Светодиодный блок.

этом минимальное значение квантовой эффективности превышает значение 21.5 %.

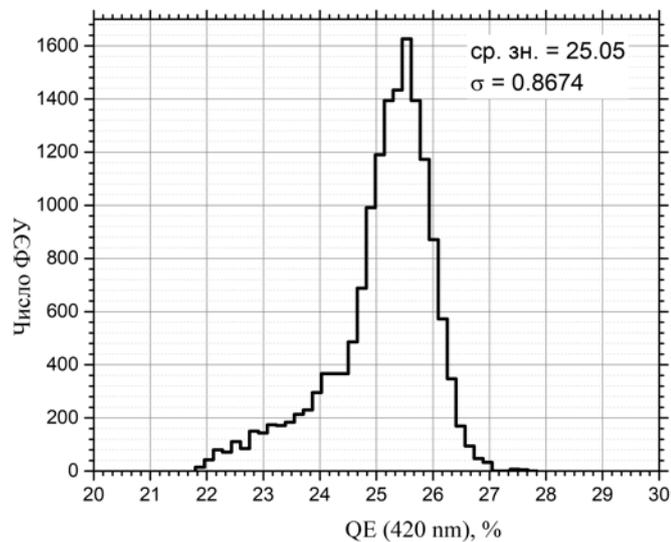


Рисунок 2.19 — Распределение измеренных образцов фотоумножителей XR72B22 по параметру «Квантовая эффективность фотокатода на длине волны 420 нм».

Разрешение зарядового спектра однофотонных импульсов лежит в диапазоне $26 \leq \sigma \leq 45$ % со средним значением $\langle \sigma \rangle \sim 32.8$ %, рис. 2.20. Отношение пик/долина (P/V) в диапазоне 2.0-4.5 со средним значением $P/V \sim 3.24$, рис. 2.21.

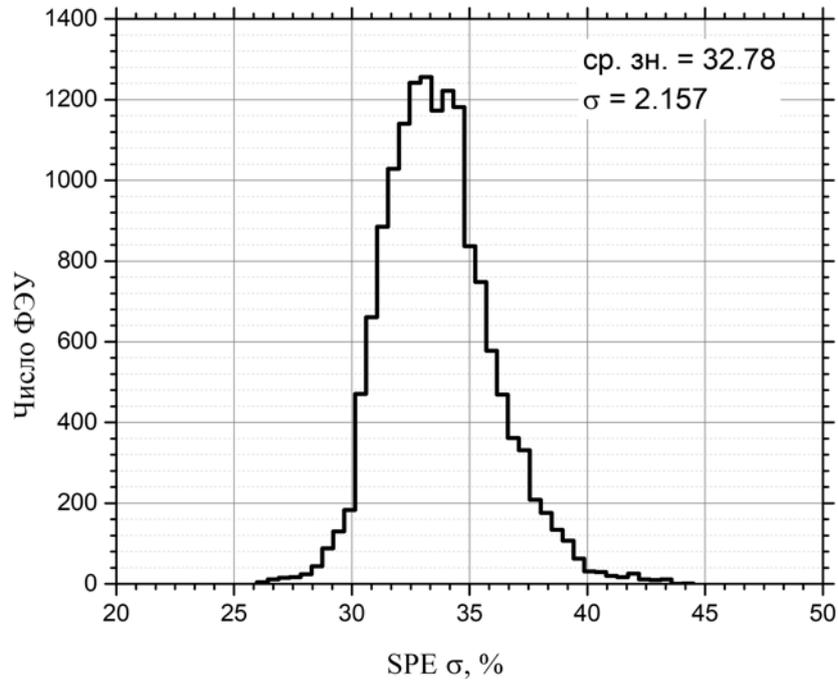


Рисунок 2.20 — Распределение измеренных образцов фотоумножителей XR72B22 по параметру «Разрешение зарядового спектра однофотоэлектронных импульсов».

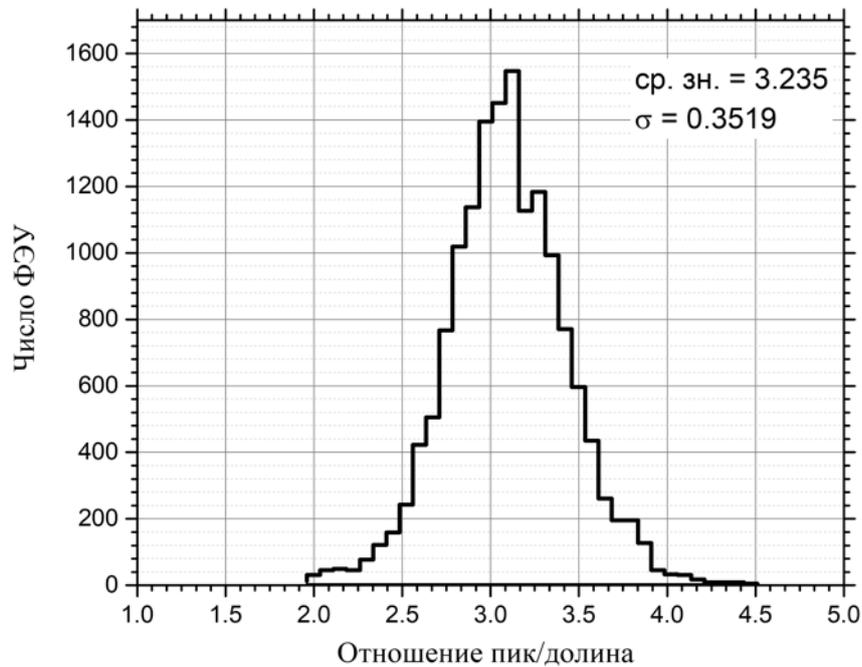


Рисунок 2.21 — Распределение измеренных образцов фотоумножителей XR72B22 по параметру «Отношение пик/долина зарядового спектра однофотоэлектронных импульсов».

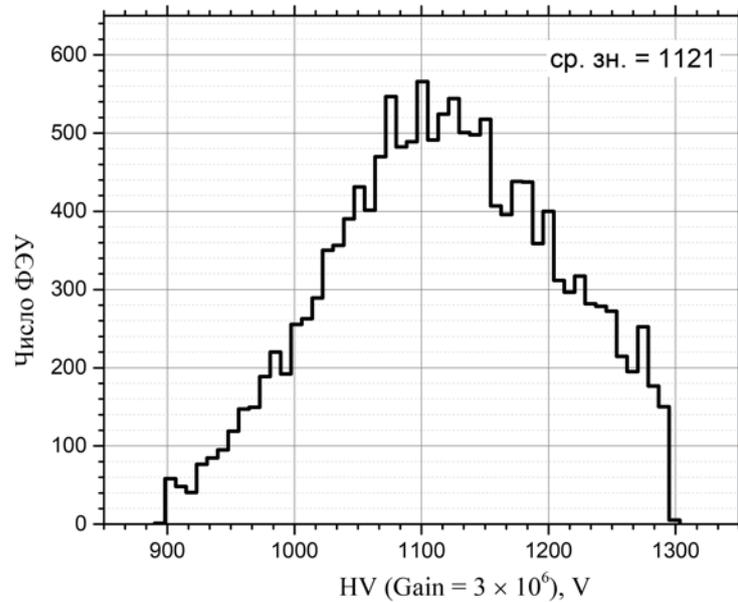


Рисунок 2.22 — Распределение измеренных образцов фотоумножителей XP72B22 по параметру «Рабочее напряжение питания при усилении $G = 3 \times 10^6$ ».

Разброс рабочего напряжения при усилении $G = 3 \times 10^6$ лежит в пределах 900 – 1300 В со средним значением 1121 В, рис. 2.22. Скорость счета импульсов темнового тока при уровне дискриминации сигналов $0.25Q_{1pe}$ (Q_{1pe} — средний заряд однофотозлектронных импульсов) и комнатной температуре в диапазоне 30 – 1800 c^{-1} с узким пиком при 170 c^{-1} . Особо следует отметить наличие образцов фотоумножителей (~ 40 шт) со скоростью счета импульсов темнового тока $\sim 10 - 30 c^{-1}$ (рис. 2.23) при усилении $G = 3 \times 10^6$ и с квантовой эффективностью $QE > 21\%$ на длине волны 420 нм. Скорость счета импульсов темнового тока при уровне дискриминации сигналов $3Q_{1pe}$ и комнатной температуре в диапазоне 2 – 31 c^{-1} с пиком при 5 – 8 c^{-1} , рис. 2.24.

При измерении времени жизни фотоумножителей контролируется усиление при постоянной засветке фотокатода, обеспечивающей постоянный анодный ток 10-100 мкА. Измеряется зависимость усиления от полного заряда, прошедшего через фотоумножитель. Время жизни фотоумножителя обычно определяется как рабочее время, за которое его усиление уменьшается на 50% [117–120]. Измерения, проведенные с тремя образцами XP72B22, показывают, что время жизни фотоумножителей более чем на два порядка [113] превышает значения, заложенные в требованиях к фотоумножителям.

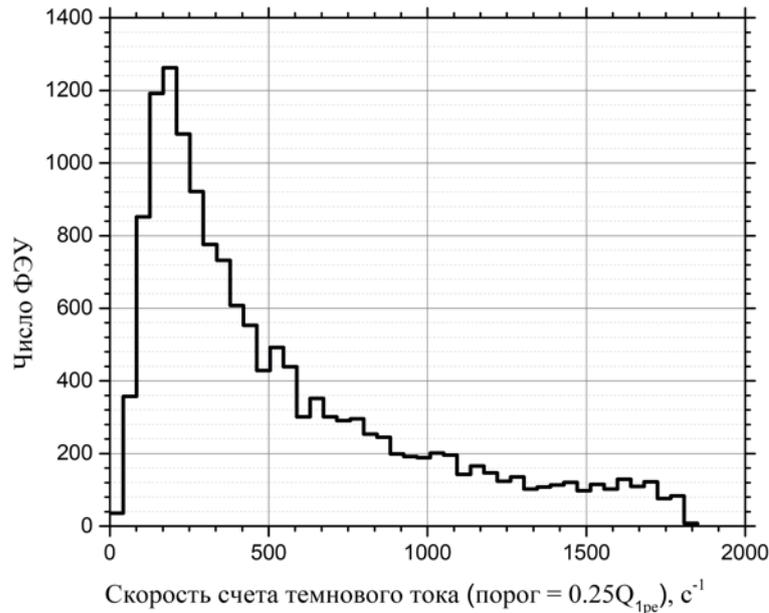


Рисунок 2.23 — Распределение измеренных образцов фотоумножителей XR72B22 по параметру «Скорость счета импульсов темного тока при уровне дискриминации сигналов, соответствующем $0.25Q_{1pe}$, где Q_{1pe} — средний заряд однофотоэлектронных импульсов».

На рис. 2.26 — 2.32 показаны примеры результатов исследований амплитудных и временных характеристик фотоумножителей XR72B22: типовые зарядовые распределения однофотоэлектронных (рис. 2.26) и многофотоэлектронных импульсов (рис. 2.27), распределение времен пролета фотоэлектронов при однофотоэлектронной засветке фотокатода (рис. 2.28) и распределение времен задержки послеимпульсов (рис. 2.29 — 2.32).

При измерениях послеимпульсов обнаружены послеимпульсы с аномально большими временами задержки от основного импульса. На рис. 2.29 и рис. 2.30 можно видеть широкий пик в области времен задержки от 20 — 50 мкс. Амплитуда этих послеимпульсов остается строго однофотоэлектронной вне зависимости от амплитуды светового сигнала. Вероятность появления этих послеимпульсов составляет 0.04 % на один фотоэлектрон. По всей видимости, эти послеимпульсы относятся к новому классу аномально задержанных послеимпульсов, открытых в работе [121].

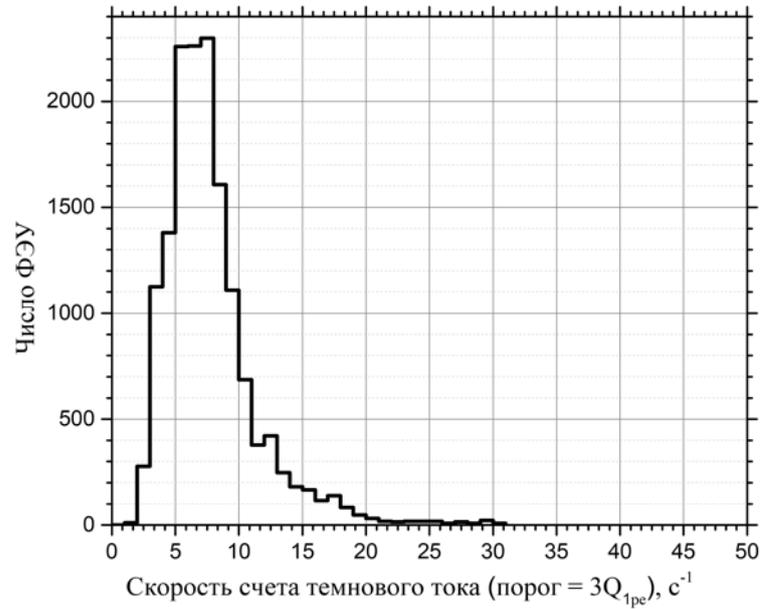


Рисунок 2.24 — «Распределение измеренных образцов фотоумножителей XR72B22 по параметру «Скорость счета импульсов темного тока при уровне дискриминации сигналов, соответствующем $3Q_{1pe}$, где Q_{1pe} — средний заряд однофотоэлектронных импульсов».

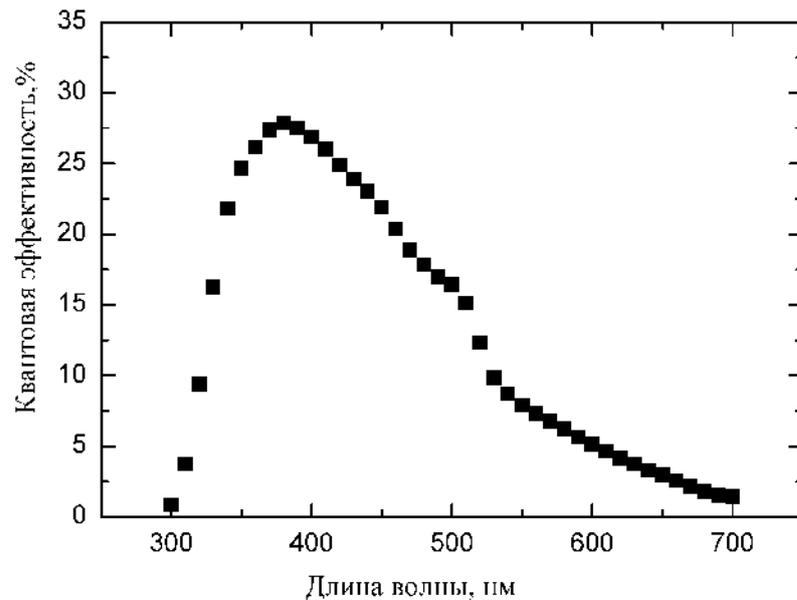


Рисунок 2.25 — Типичная кривая зависимости квантовой эффективности 3-дюймовых фотоумножителей эксперимента JUNO. Кривая приведена для образца №018596.

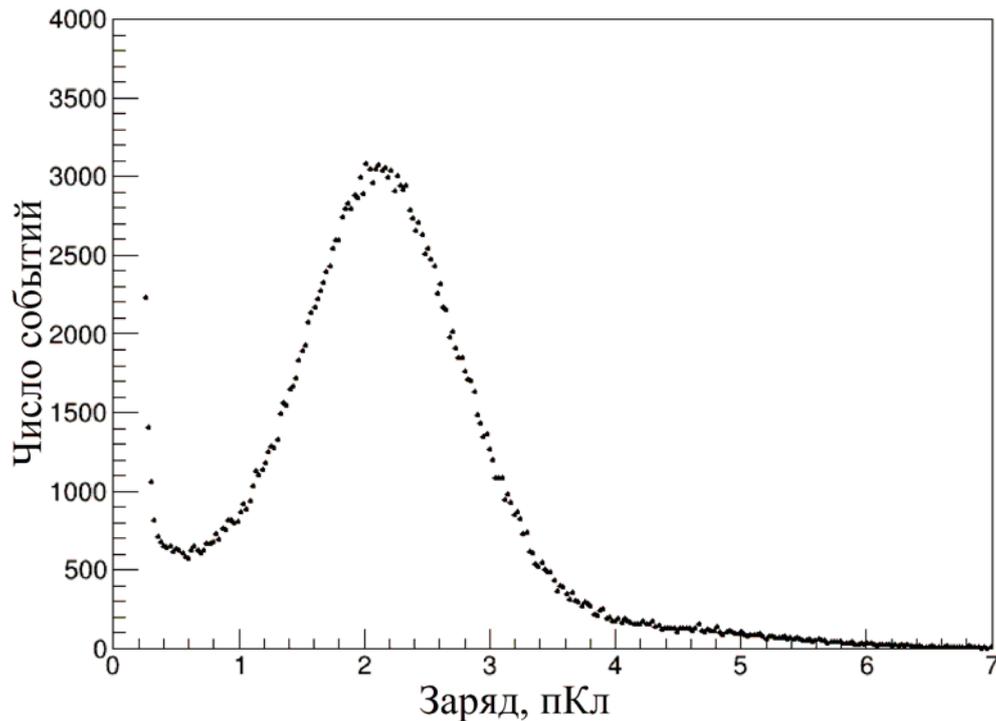


Рисунок 2.26 — Типичное зарядовое распределение однофотоэлектронных импульсов фотоумножителя XP72B22 эксперимента JUNO. Распределение приведено для образца №018596.

Типичная зависимость квантовой эффективности фотокатода фотоумножителя XP72B22 от длины волны представлена на рис. 2.25. Спектральная кривая типична для бищелочного фотокатода K-Cs-Sb. Максимум чувствительности фотокатода достигается на длинах волн 370 — 380 нм. Резкое падение чувствительности к 300 нм обусловлено падением прозрачности стеклооболочки. Квантовая эффективность фотокатода остается высокой ($\sim 25\%$) на длине волны 420 нм, в максимуме спектра излучения жидкого сцинтиллятора эксперимента JUNO.

Как видно из рисунка 2.26, в типичном зарядовом спектре однофотоэлектронных импульсов наблюдается пик, что свидетельствует о высокой эффективности регистрации фотоэлектрона диодной системой фотоумножителя.

Хорошее разрешение однофотоэлектронного пика приводит к тому, что в зарядовом спектре многофотоэлектронных импульсов наблюдаются пики, обусловленные вылетом с фотокатода фотоумножителя одного, двух, трех и даже четырех фотоэлектронов, рис. 2.27.

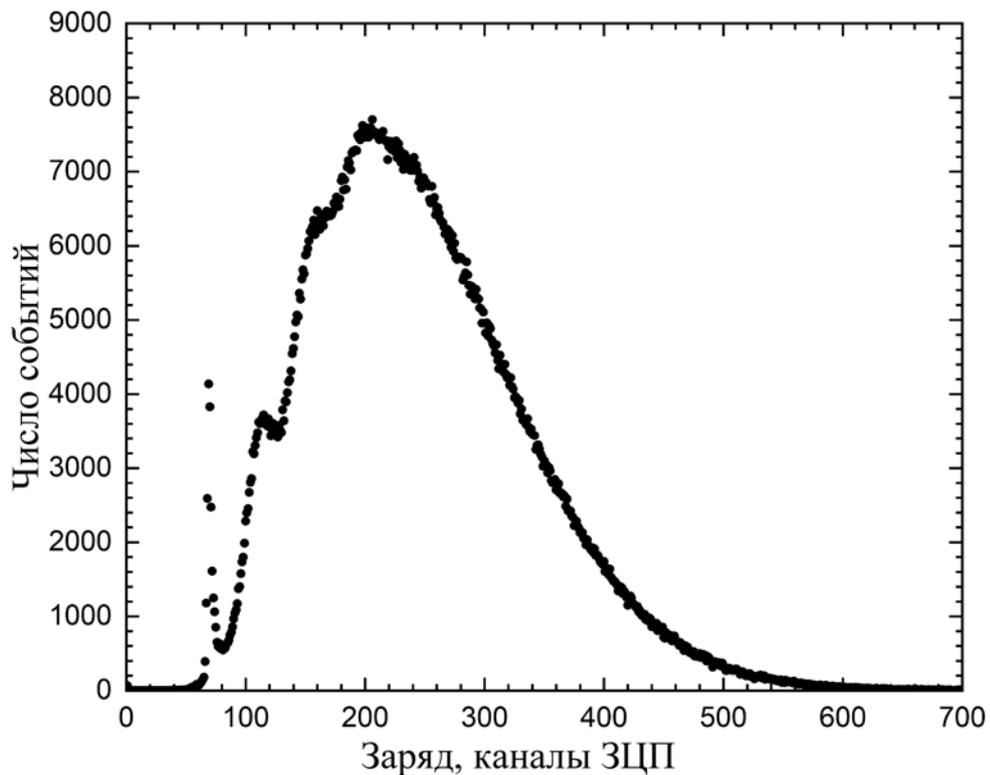


Рисунок 2.27 — Типичное зарядовое распределение многофотоэлектронных импульсов фотоумножителя XP72B22 эксперимента JUNO. Распределение приведено для образца №018596.

Требования к временному разрешению 3-дюймовых фотоумножителей эксперимента JUNO не столь высоки. Они даже отнесены к категории В, см. требования на странице 54 данной главы. Распределение времен пролета фотоэлектронов при однофотоэлектронной засветке фотокатода фотоумножителя XP72B22, приведенное на рис. 2.28, характеризуется полной шириной на половине высоты 3.2 нс. Вероятность появления предимпульсов не более 5 % на один фотоэлектрон, а вероятность появления задержанных импульсов не превышает 4 % на фотоэлектрон.

Существование anomalно сильно задержанных послеимпульсов в фотоумножителе XP72B22, рис. 2.29, может показаться на первый взгляд не существенным (как уже отмечалось, вероятность их появления не превышает 0.04 % на фотоэлектрон). Однако, это явление может оказывать влияние на поиск редких, коррелированных во времени событий. Эти послеимпульсы хорошо видны и на осциллограммах, рис. 2.30. Природа таких послеимпульсов на сегодняшний день еще не выяснена. Одно можно сказать вполне определенно — такие послеимпульсы сложно объяснить «традиционной», общепринятой моделью обратного ионного тока, то есть ионизацией атомов остаточного газа.

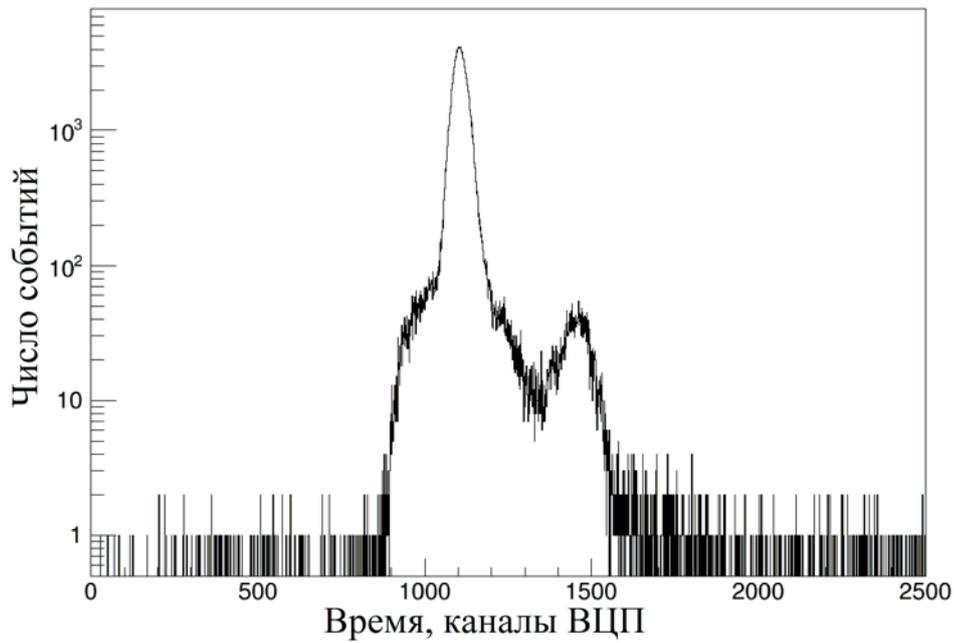


Рисунок 2.28 — Типичное распределение времен пролета фотоэлектронов при однофотоэлектронной засветке фотокатода фотоумножителя XR72B22 эксперимента JUNO (1 канал ВЦП — 75 пс). Распределение приведено для образца №018596.

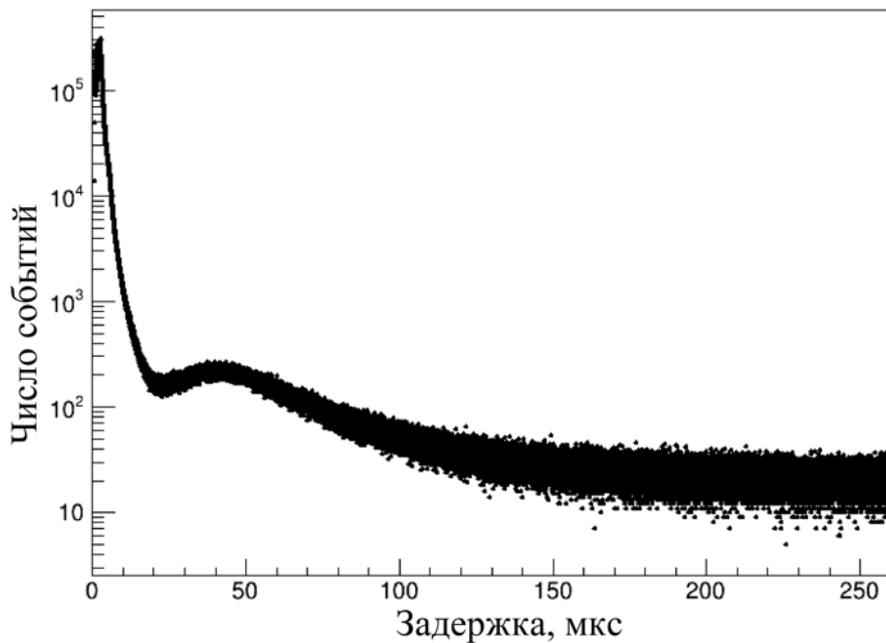


Рисунок 2.29 — Типичное распределение времен задержки послеимпульсов с аномальными временами задержки от основного импульса фотоумножителя XR72B22 эксперимента JUNO. Образец №018596.

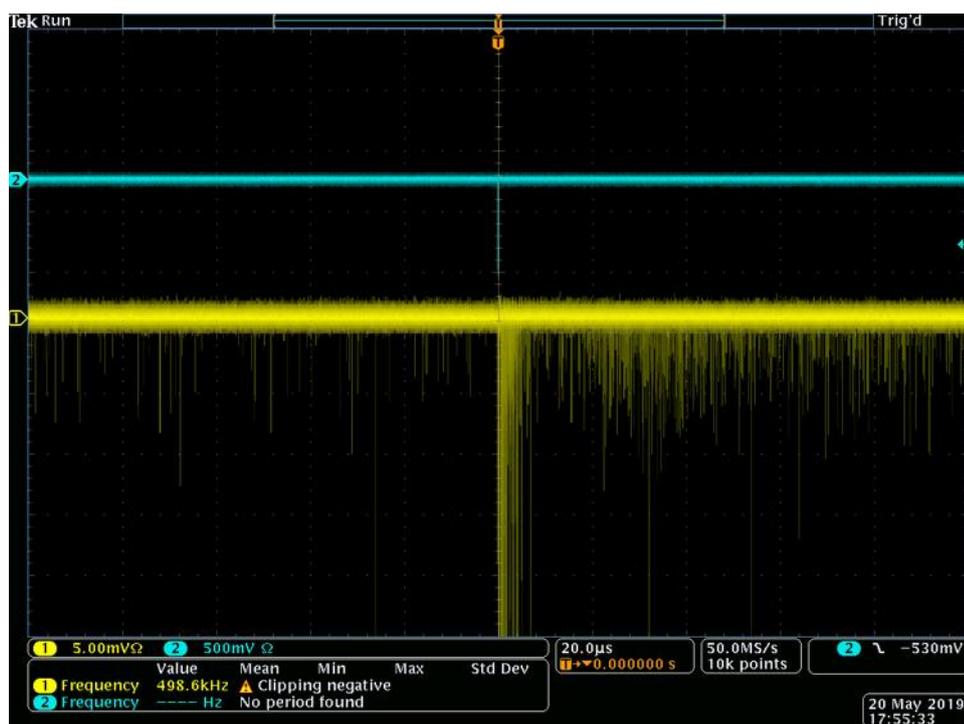


Рисунок 2.30 — Осциллограмма послеимпульсов с аномально большими временами задержки от основного импульса фотоумножителя XP72B22 эксперимента JUNO. Образец №018596.

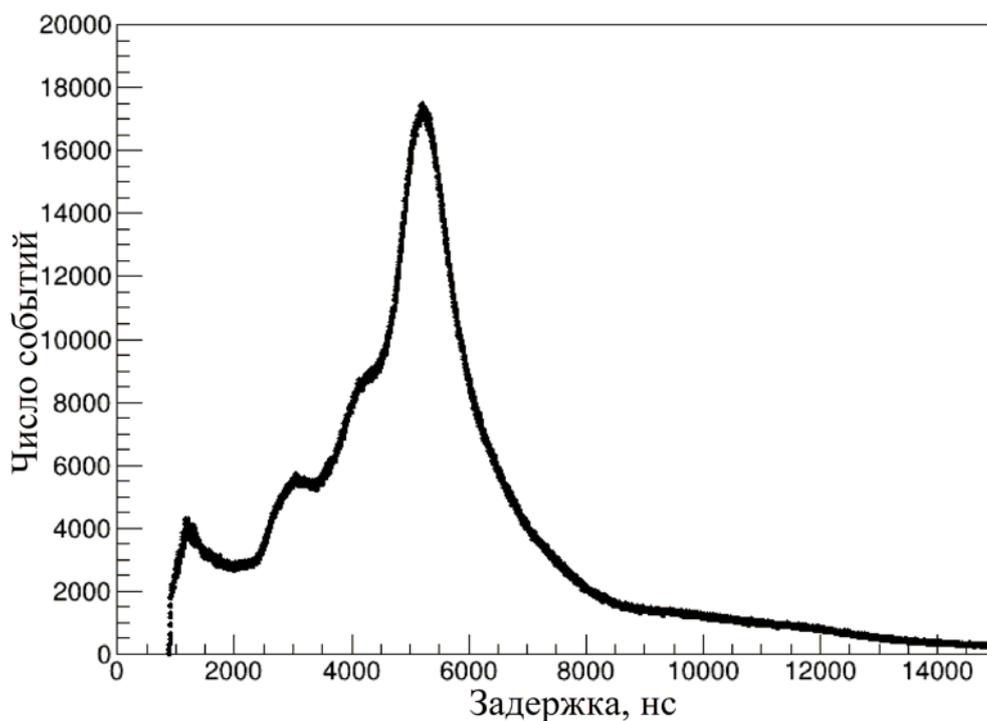


Рисунок 2.31 — Типичное распределение времен задержки «традиционных» послеимпульсов от основного импульса фотоумножителя XP72B22 эксперимента JUNO. Образец №018596.

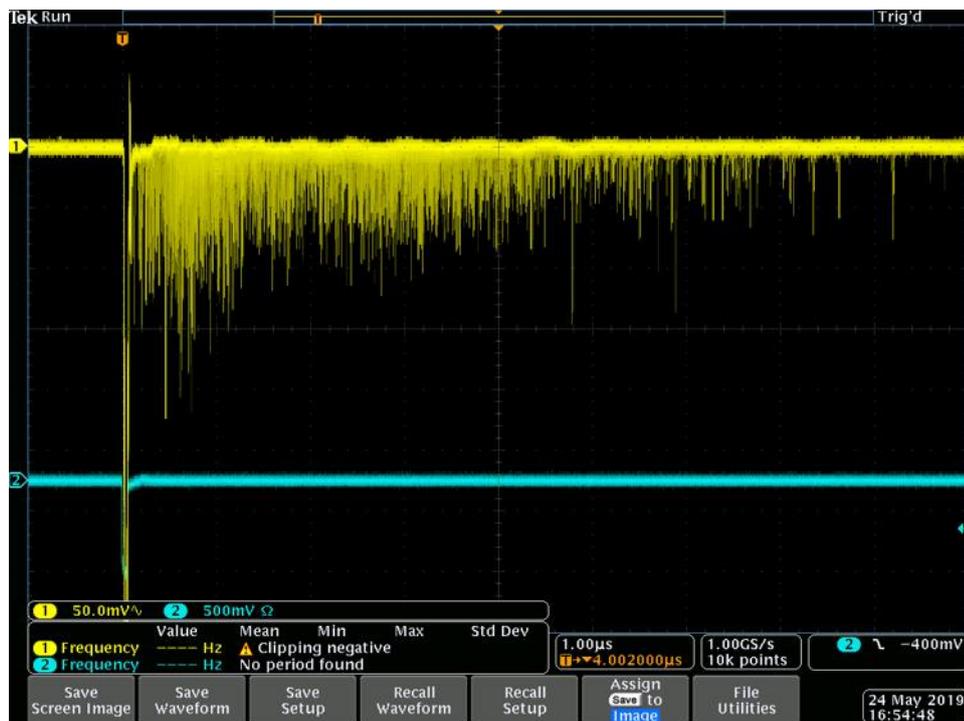


Рисунок 2.32 — Осциллограмма «традиционных» послеимпульсов фотоумножителя XR72B22 эксперимента JUNO. Образец №018596.

На рис. 2.31 показано распределение времен задержки «традиционных» послеимпульсов фотоумножителя XR72B22. Разброс времен задержки таких послеимпульсов от основного импульса лежит в диапазоне от сотен наносекунд до 10 – 15 мкс с пиками, обусловленными различными ионами остаточного газа. Эти послеимпульсы также хорошо видны и на осциллограмме, рис. 2.32.

Заключение к Главе 2

1. Разработана и создана калибровочная система на базе быстродействующего светодиодного источника света и пластиковых оптоволоконных кабелей. Образцы такой калибровочной системы успешно использовались при проведении массового тестирования 3-дюймовых фотоумножителей центрального детектора эксперимента JUNO.
2. Исследованы основные временные и амплитудные параметры 3-дюймового фотоумножителя XR72B22 эксперимента JUNO.
3. При исследовании послеимпульсов фотоумножителей XR72B22 обнаружены anomalно сильно задержанные послеимпульсы с временами задержки 20 – 160 мкс от основного импульса. При этом амплитуда послеимпульсов остается строго однофотонной независимо от ам-

плитуды основного сигнала. Вероятность появления послеимпульсов не превышает 0.04 % на один фотоэлектрон.

Глава 3. Калибровочные системы полутонного прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа

3.1 Полутонный прототип Баксанского большого нейтринного телескопа

Как говорилось уже в предыдущей главе, эксперимент JUNO располагается на расстоянии 53 км от мощных реакторных комплексов. Данное обстоятельство накладывает определенные ограничения, например, при исследованиях потоков геонейтрино. Расположение подземной лаборатории Галлий-германиевого нейтринного телескопа (ГГНТ) Баксанской нейтринной обсерватории Института ядерных исследований РАН (БНО ИЯИ РАН) предлагают прекрасную возможность для создания крупномасштабного жидко-сцинтилляционного нейтринного телескопа. Удаленность от ядерных реакторов и значительная глубина залегания лаборатории ГГНТ действительно являются несомненным достоинством расположения лаборатории.

Полутонный прототип Баксанского Большого Нейтринного Телескопа (ББНТ) [122–127] — первая ступень многоэтапного проекта по созданию детектора с массой мишени 10 кт. В полутонном прототипе, соответственно, масса жидкого сцинтиллятора составляет 0.5 т. При создании полутонного прототипа необходимо решать целый спектр задач: совершенствование методов очистки жидких сцинтилляторов, а также осуществление контроля за их параметрами; осуществление контроля конструкционных материалов детектора [128]; проведение исследований параметров фотодетекторов (вакуумных и кремниевых); разработка системы регистрации событий, алгоритмов обработки данных, проведение плановых калибровочных измерений и т.д.

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 равно 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 [129]. В 10^7 раз поток мюонов космических лучей ниже в зале ГГНТ, чем на поверхности. Стены зала

выполнены из низкорadioактивного бетона толщиной 70 см, на котором закреплены стальные листы толщиной 0.6 см. Такая защита служит для снижения фона быстрых нейтронов и γ -фона от окружающих пород.

Полутонный прототип (рис. 3.1) состоит из акриловой сферы внешним диаметром 1 м, заполненной жидким сцинтиллятором, металлическим каркасом для крепления ФЭУ и сферы, и всё это помещается в армированный стальным каркасом цилиндрический бак (объемом 11.5 м³) из сополимерного полипропилена (ПП-С). Акриловая сфера с толщиной стенки 2 см, материал изготовления полиметилметакрилат с показателем преломления $n = 1.5$ на длине волны 420 нм. К полюсам сферы крепятся два патрубка диаметром 90 мм, верхний патрубок более длинный, чем нижний. Это обусловлено эксплуатационными особенностями. С более длинным патрубком верхний фланец находится на одном уровне с верхней частью каркаса, что упрощает обслуживание детектора во время выполнения технических работ. К патрубкам через акриловые фланцы крепятся система ПВХ труб с кранами для осуществления операций заполнения и слива сцинтиллятора.

В полутонном прототипе используются 10-дюймовые ФЭУ фирмы НАМАМАТСУ модель R7081-100 WA-S70, рис. 3.2. Делитель находится под слоем гидроизоляции, наружу выходит один коаксиальный кабель RG-303/U длиной 70 м. Этот кабель одновременно служит для получения сигнала и передачи высоковольтного напряжения питания. Для выделения полезного сигнала применяется разделительная цепь, рис. 3.3.

Металлический каркас для крепления сферы и ФЭУ представляет собой разборное изделие, состоящее из 2 частей. Материал: нержавеющая сталь AISI 316L, трубы \varnothing 25 мм. Каркас повторяет форму правильного десятиугольника, расстояние между центрами диаметрально расположенных вертикальных стоек составляет 2200 мм, высота вертикальных стоек — 2200 мм. Для крепления акриловой сферы на каркасе установлены по 5 креплений снизу и сверху, касание крепления и сферы осуществляется посредством акриловых тарелок. Также на каркасе закреплены 20 ФЭУ. Условно по высоте каркас можно разделить на 4 уровня, на каждом находятся по 5 ФЭУ. На рис. 3.4 показана акриловая сфера и каркас с закрепленными на нем фотоумножителями перед заполнением сферы жидким сцинтиллятором и установкой в водный бак. Крепления для двух центральных уровней отличается от крайних, что позволяет выдержать одинаковое расстояние до акриловой сферы для всех ФЭУ. ФЭУ закрепляется посредством



Рисунок 3.1 — Модель полутонного прототипа ББНТ.



Рисунок 3.2 — Фотоумножитель R7081-100 WA-S70 прототипов ББНТ.

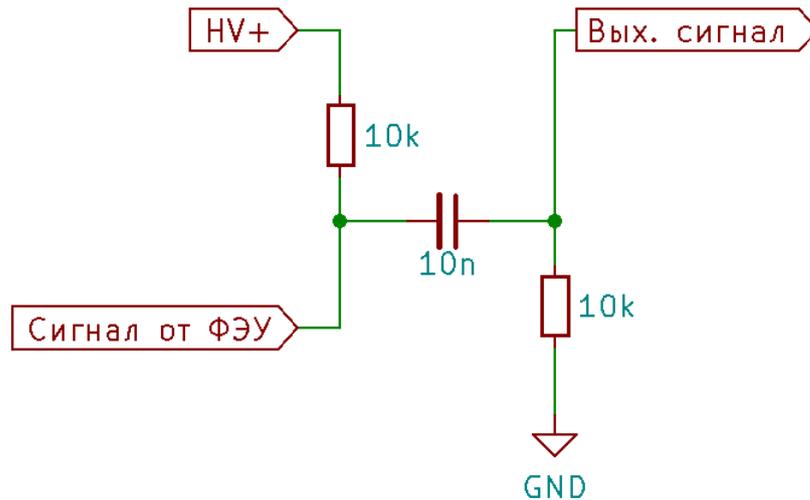


Рисунок 3.3 — Разделительная цепь для выделения анодных сигналов фотомножителей R7081-100 WA-S70 прототипов ББНТ.

двух полуколец, выполненных из материала ZEDEX-100k. Полукольца имеют заведомо больший внутренний диаметр для учёта нестабильности диаметра той части стеклооболочки ФЭУ, за которую происходит крепление к каркасу. Нестабильность диаметра цилиндрической части ФЭУ обусловлена тем, что на ФЭУ заводом-изготовителем выполнены работы по гидроизоляции, из-за которой цилиндрической части ФЭУ присутствуют неровности. Для компенсации неровности поверхности и увеличенного внутреннего диаметра креплений использовались пластины из ZEDEX-100k.

Полипропиленовый армированный бак можно условно разделить на три основные части: нижний и верхний ярусы, а также верхнюю крышку. На верхней крышке располагаются четыре люка, два из которых используются для вывода кабелей от ФЭУ.

Полутонный прототип — двухзонный детектор: акриловая сфера с жидким сцинтиллятором, окруженная сверхчистой водой. Перед тем, как вода попадёт в полипропиленовый бак объёмом 11.5 м^3 , она проходит подготовительную цепочку: освещение, обезжелезивание, дехлорирование, умягчение, УФ обеззараживание, систему фильтров. После прохождения всех этапов чистота воды составляет 0.05 мкСм (для бытовой дистиллированной воды этот параметр равняется $2\text{-}5 \text{ мкСм}$).



Рисунок 3.4 — Акриловая сфера для жидкого сцинтиллятора и фотоумножителя R7081-100 WA-S70, установленные на каркасе, полутонного прототипа ББНТ.

3.2 Светодиодная калибровочная система

3.2.1 Светодиодный модуль на основе платы ARDUINO NANO

Управление светодиодным модулем, описание которого было в разделе 2.4, возможно только с передней панели устройства посредством галетного переключателя (для изменения частоты запускающих импульсов), многооборотного потенциометра (для регулировки напряжения, подаваемого на светодиодный драйвер) и тумблера, который используется для быстрого отключения питания от драйвера. Для того, чтобы была возможность «удаленного» управления устройством, была поставлена задача — разработка светодиодного модуля под управлением специализированной платы. Задачи, которые должна решать плата управления:

- иметь возможность управления с лицевой панели устройства;
- осуществление управления от персонального компьютера (ПК);

- 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).

В качестве основы была выбрана платформа ARDUINO NANO с установленным 8-битным микроконтроллером (МК) ATmega328p [130]. Этот микроконтроллер имеет два 16-битных и один 8-битный таймеры. С помощью 16-битных таймеров, посредством широтной импульсной модуляции (ШИМ), осуществляется точная регулировка напряжения и генерации TTL-сигнала, необходимого для работы светодиодного драйвера. 8-битный таймер используется для системных нужд МК. Также стоит отметить, что данная платформа оснащается преобразователем USB-TTL, решающий задачу взаимодействия платформы с ПК. Была разработана печатная плата (рис. 3.5), габариты составляют 70 мм × 84 мм.

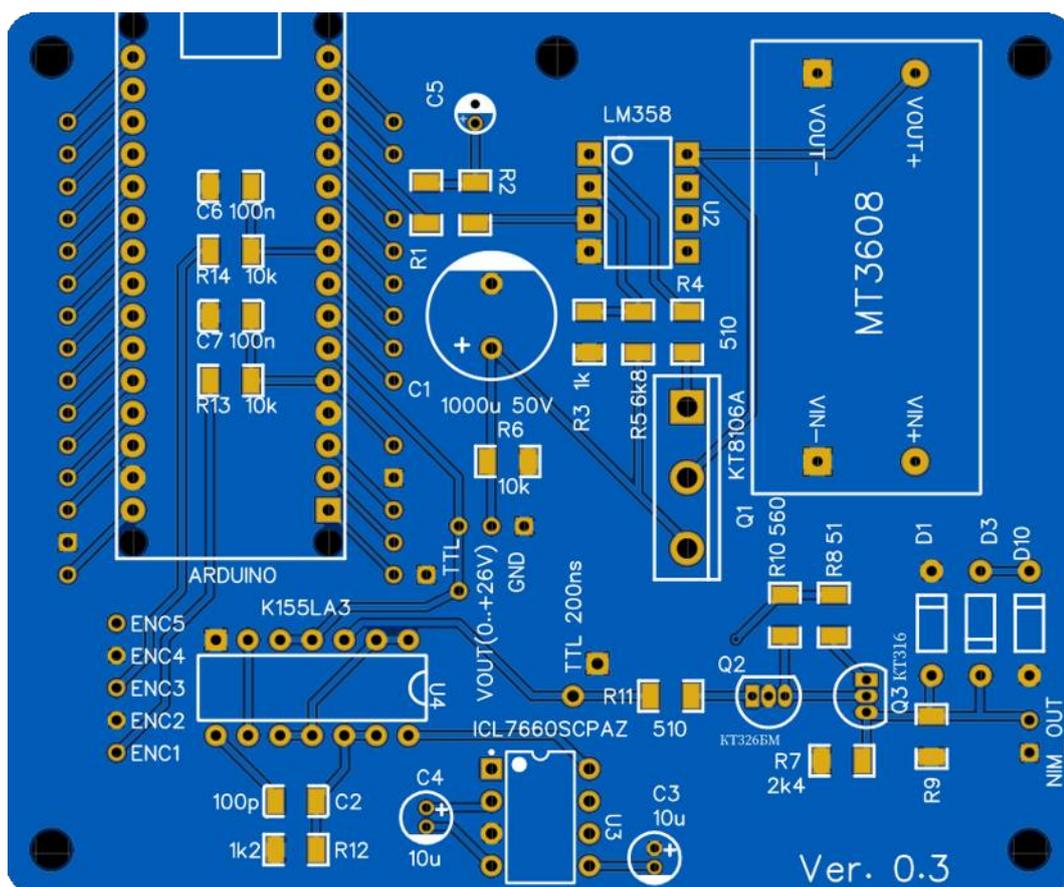


Рисунок 3.5 — Печатная плата управления на основе ARDUINO NANO.

Печатную плату можно условно разделить на несколько функциональных блоков:

- система управления и связи с ПК (ARDUINO NANO) 3.6;
- регулировка напряжения, поступающего на LED драйвер (рис. 3.8);
- генератор TTL-сигнала, необходимого для работы LED драйвера и синхронизации с другим измерительным оборудованием;
- повышающий DC-DC преобразователь (5 В \rightarrow 26 В);
- преобразователь +5 В в -5 В, необходимого для преобразователя TTL-NIM;
- преобразователь TTL-NIM (рис. 3.7).

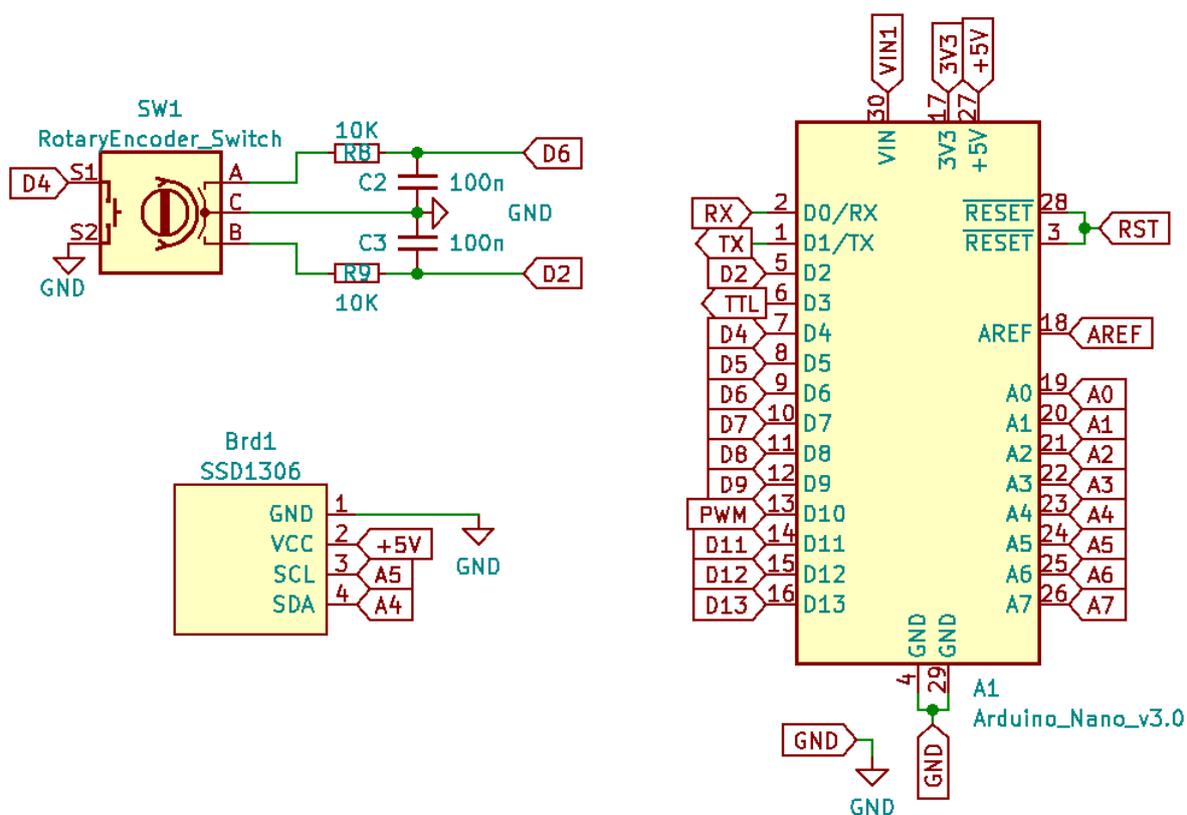


Рисунок 3.6 — Часть схемы с описанием подключения к ARDUINO NANO энкодера и дисплея.

Стоит отметить, что в этом устройстве применялся ещё один готовый модуль — повышающий преобразователь напряжения, реализованный на микросхеме MT3608. Подстроечным резистором осуществляется настройка преобразователя, чтобы при входном напряжении 5 В, выходное составляло 26 В. Далее это напряжение поступает на часть платы, которая осуществляет точную регулировку напряжения для питания светодиодного драйвера.

Схема регулировки напряжения основана на операционной усилителе LM358 и составном транзисторе КТ8106А. Применение этой схемы и соот-

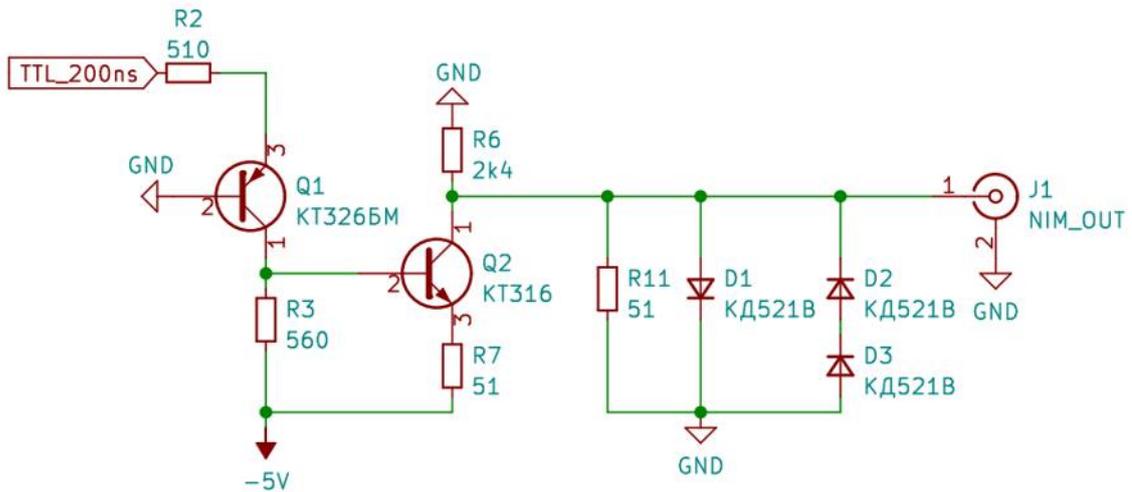


Рисунок 3.7 — Принципиальная схема преобразователя TTL-NIM.

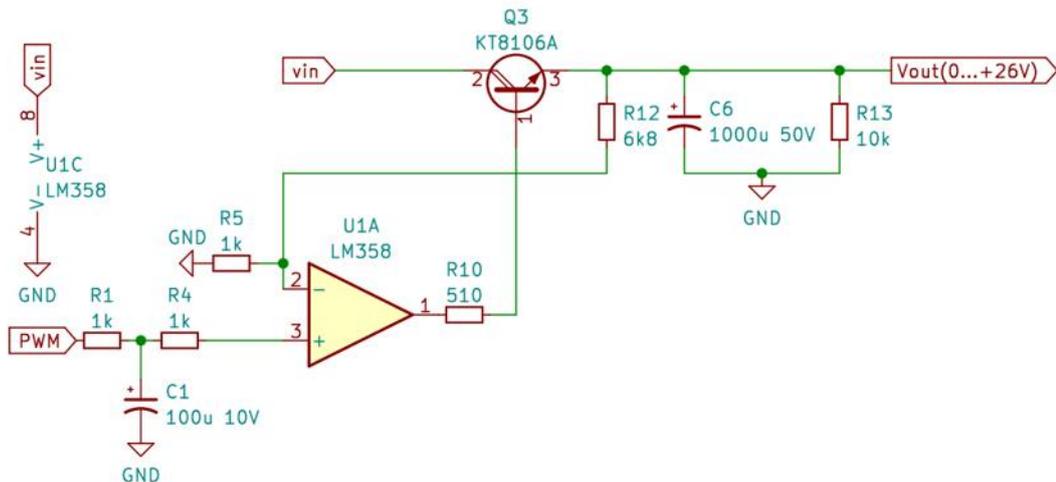


Рисунок 3.8 — Принципиальная схема регулировки напряжения с управлением от ШИМ-сигнала.

ветствующие настройки ШИМ-сигнала позволяют достичь шага регулировки напряжение 2 мВ. Генерация TTL-сигнала осуществляется средствами МК, но далее сигнал используется не напрямую, а через микросхему К155ЛА3 (либо аналог IN74АС00N), содержащую четыре логических элемента «2И-НЕ». На микросхеме К155ЛА3 собран ждущий мультивибратор, на выходе которого длительность TTL-сигнала составляет 200 нс (рис. 3.9). Далее TTL-сигнал с заданной длительностью поступает на схему TTL-NIM преобразователя и на соответствующий разъём на передней панели для синхронизации. Для получения отрицательного напряжения использовалась специализированная микросхема ICL7660 (рис. 3.10).

Питание LED блока организовано таким образом, что для работы необходимо 2 источника питания: один для «управляющей» части, второй —

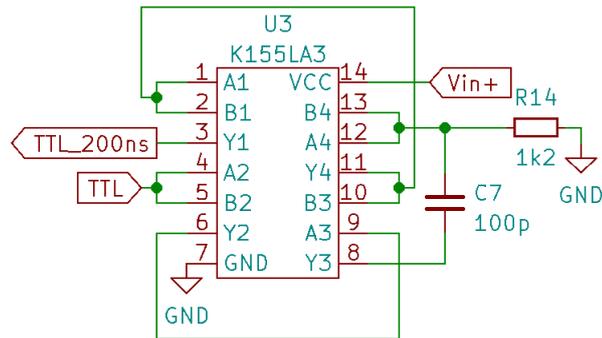


Рисунок 3.9 — Ждущий мультивибратор на микросхеме К155ЛА3.

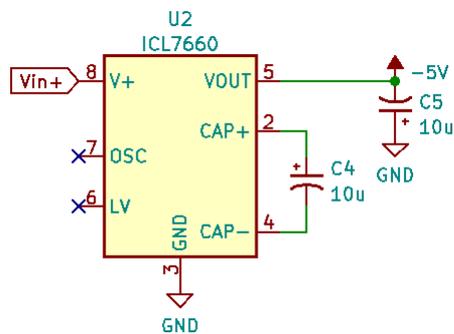


Рисунок 3.10 — Микросхема ICL7660 для получения питания отрицательной полярности.

для получения 26 В. На рис. 3.11 представлены изображения разработанного светодиодного блока. Управление с ПК возможно посредством специально написанной программы так и через любой эмулятор терминала, путём отправки команд. Для подключения используется последовательное соединение стандарта СОМ на скорости 9600 бод.



а)



б)

Рисунок 3.11 — Светодиодный блок на базе ARUINO NANO: а) вид спереди; б) вид сверху без верхней крышки.

3.2.2 Светодиодный модуль под управлением МК семейства STM32F4

Плата управления, описанная в предыдущем разделе, в силу технических особенностей МК ATmega328P, предоставляет возможность независимого управления только одним светодиодным драйвером. Это ограничение возникает из-за количества доступных аппаратных таймеров, т. е. один таймер используется для регулировки частоты TTL-сигнала, другой — для регулировки напряжения. Для проведения некоторых измерений, например исследования линейности отклика ФЭУ при помощи двух светодиодных драйверов, применение светодиодного блока на базе ARDUINO NANO не представляется возможным. Для решения задачи управления несколькими светодиодными драйверами последовала разработка соответствующей платы управления. На рис. 3.12 приведена принципиальная схема основной части платы управления четырьмя светодиодными драйверами. В качестве управляющего МК был выбран STM32F401CC6 (STMicroelectronics) [131]. Данный МК, в зависимости от конфигурации, может иметь до 6 16-битных аппаратных таймеров. В текущей версии платы управления для светодиодных драйверов используются 5 таймеров: 4 на каждый драйвер для настройки напряжения, 1 для генератора TTL-сигнала. Всё четыре драйвера запускаются от одного источника TTL-сигнала, т. е. синхронизированы между собой. На рис. 3.13 показан проект разработанной двухслойной печатной платы (с размерами 99.06 мм × 99.06 мм) независимого управления четырьмя светодиодными драйверами. На лицевой панели устройства (рис. 3.14) размещены органы управления: одна тактовая кнопка, четыре двухпозиционных переключателя, один энкодер. Также на лицевой панели установлены четыре оптических разъёма (SMA905/906), дисплей для индикации состояния устройства и высокочастотный разъём (LEMO 00b) для синхронизации.

Посредством МК осуществляется независимое управление четырёх каналов регулировки напряжения. Здесь применяется схема регулировки напряжения, описанная ранее (рис. 3.8). Также для каждого канала используется отдельный повышающий DC-DC преобразователь напряжения. В отличие от блока на основе ARDUINO NANO, здесь повышающий преобразователь интегрирован в общую печатную плату. Принципиальная схема повышающего

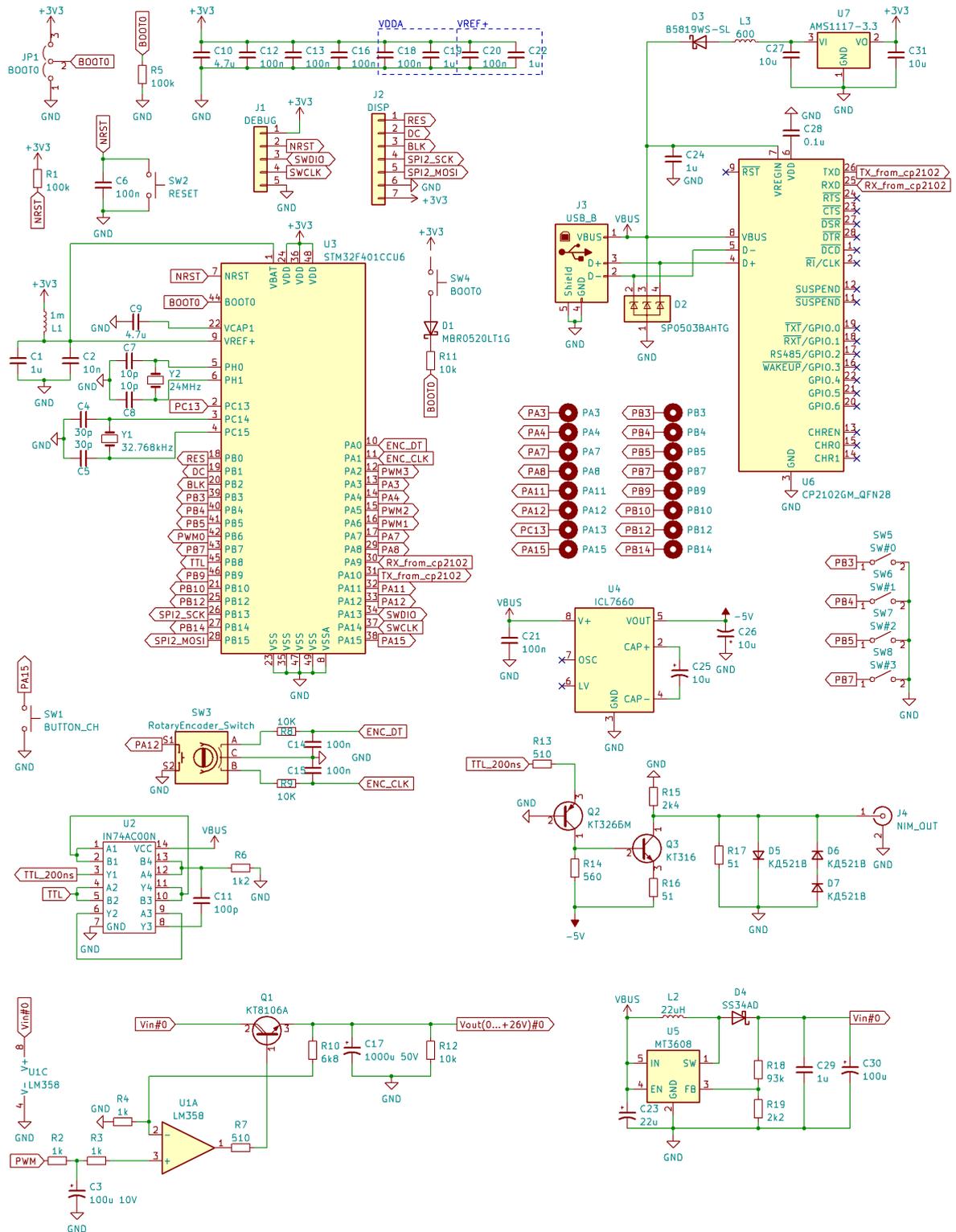


Рисунок 3.12 — Принципиальная схема платы управления на МК STM32F401CCU6.

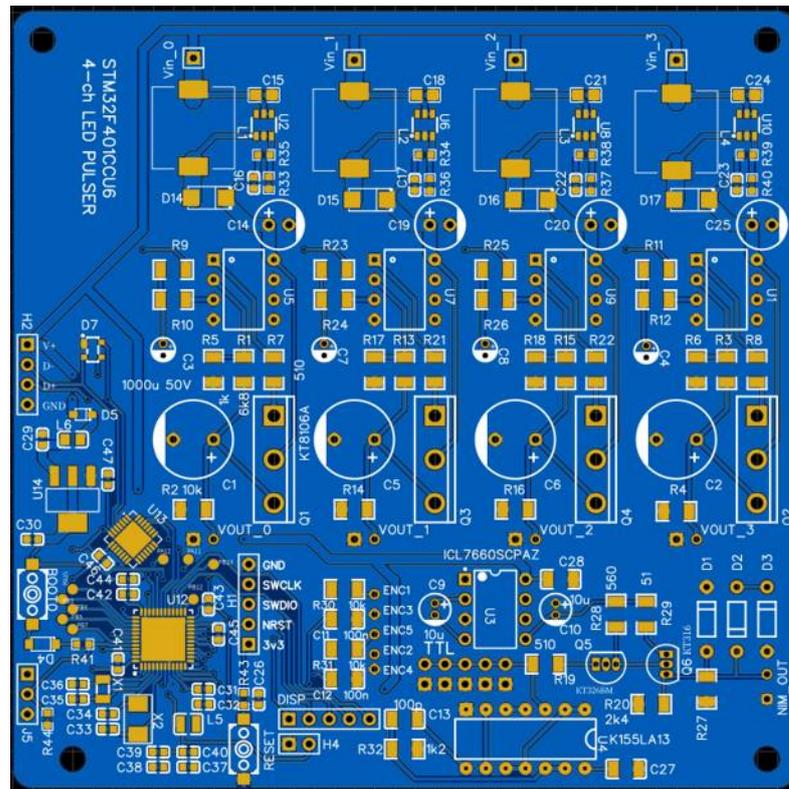


Рисунок 3.13 — Проект печатной платы управления на МК STM32F401CCU6.

DC-DC преобразователя на микросхеме MT3608 [132] приведена на рис. 3.15. Отличие этой схемы от рекомендованной производителем в том, что был добавлен сглаживающий конденсатор $C30$ ёмкостью 100 мкФ. Входное напряжение 5 В поступает от USB-разъёма (type B) на задней панели устройства, номиналами резисторов $R18$ и $R19$ выходное напряжение устанавливается равным 26 В.

Связь STM32F401CCU6 с ПК осуществляется через микросхему преобразователя интерфейса USB \leftrightarrow UART CP2102 (SILICON LABS) [133]. Для защиты МК электростатического разряда со стороны USB-разъёма применяется сборка защитных диодов SP0503BAN TG. В данном светодиодном модуле питание и управление осуществляется через один USB-разъём, для программирования и отладки выведен отдельный разъём (DIP-10), к которому подключается соответствующий программатор.

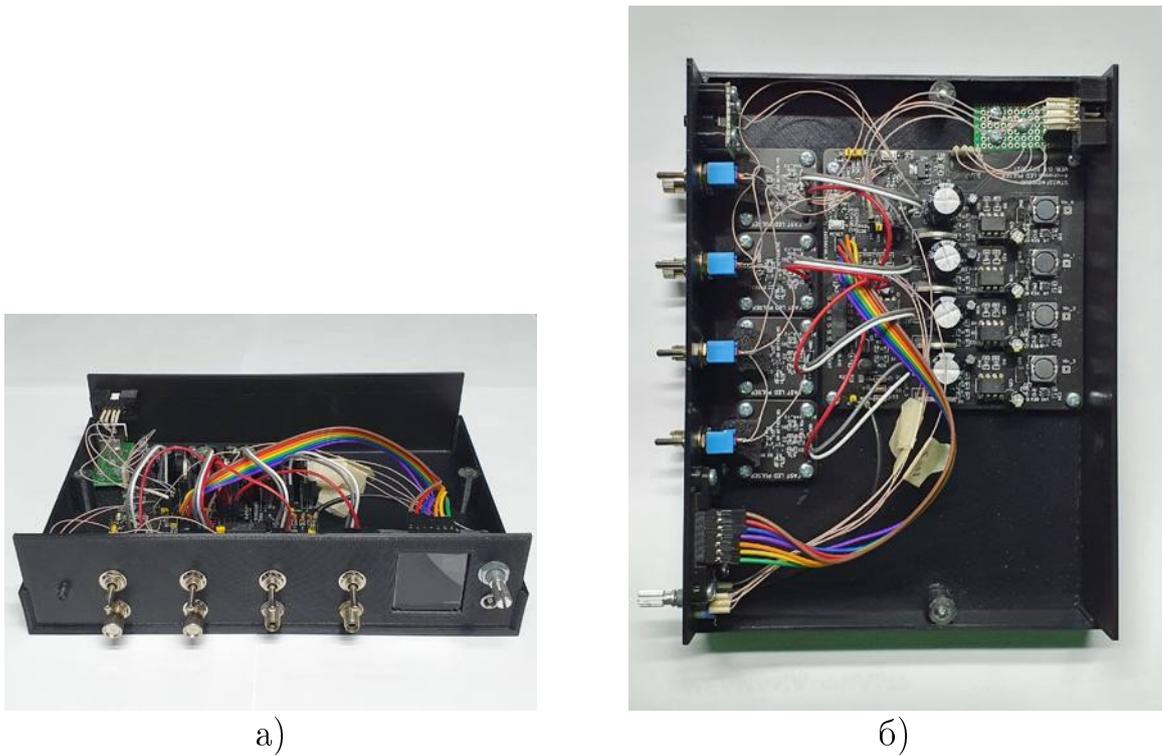


Рисунок 3.14 — Светодиодный блок на базе STM32F401CCU6: а) вид спереди; б) вид сверху без верхней крышки.

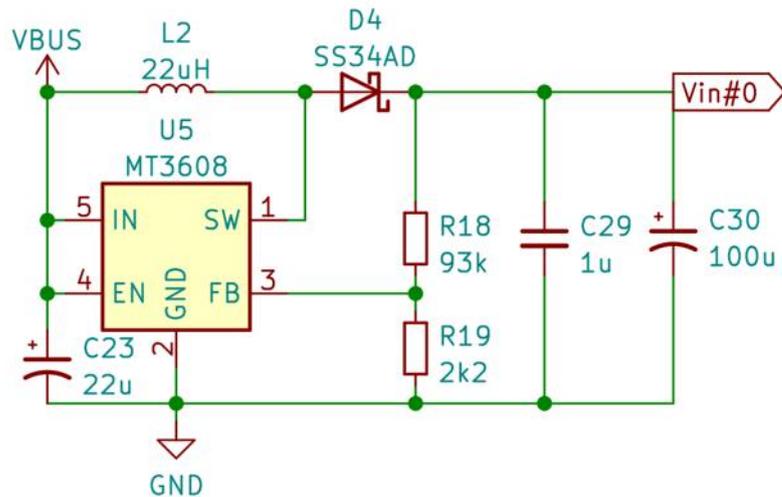


Рисунок 3.15 — Повышающий DC-DC преобразователь на микросхеме MT3608.

3.2.3 Светодиодный модуль под управлением МК Cypress CY8C4245AXI-483

Совместно с платой управления на МК STM32 была разработана соответствующая плата на МК Cypress CY8C4245AXI-483, на рис. 3.19 представлено изображение готового устройства, а на рис. 3.16 — 3.18 — принципиальная

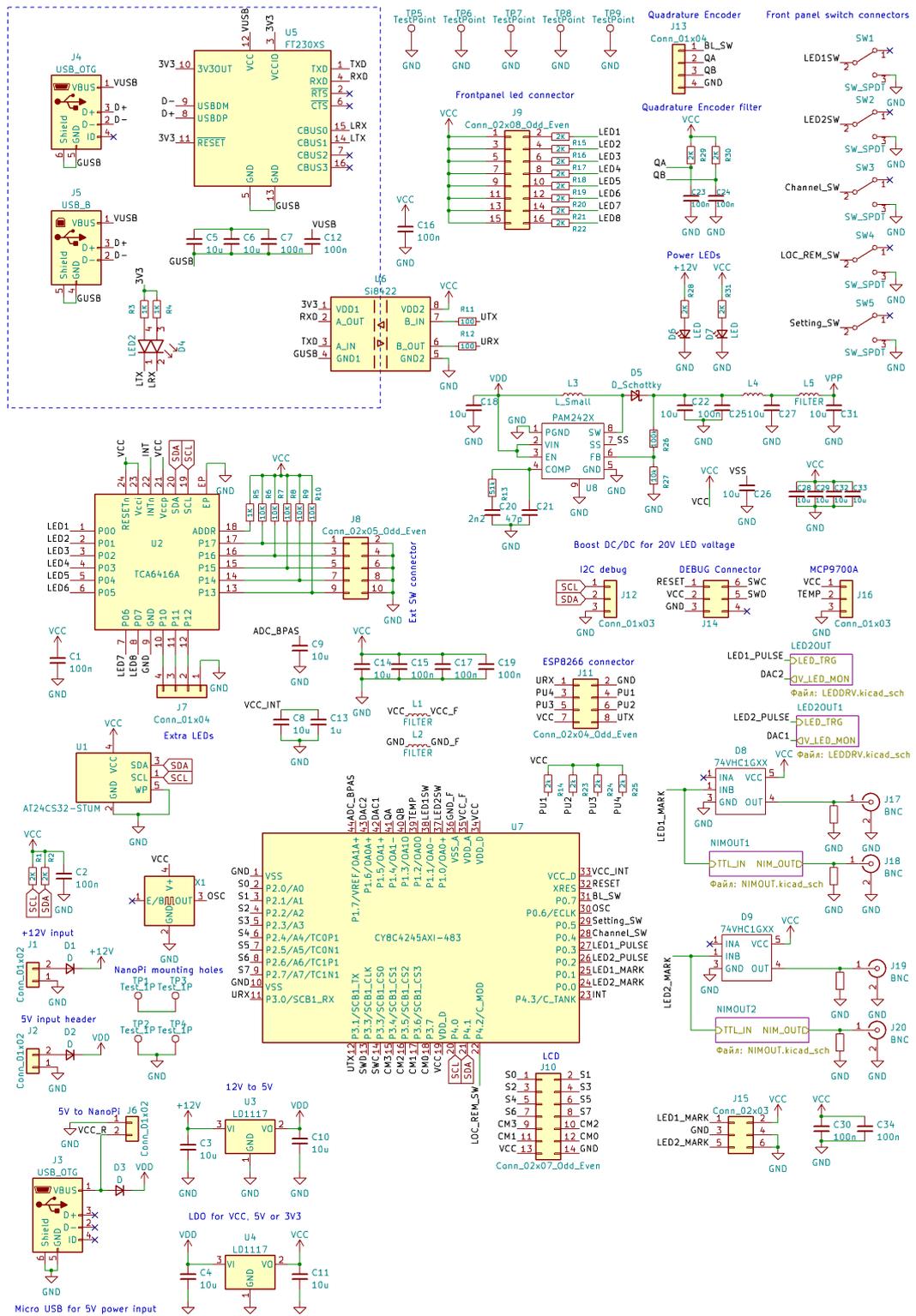


Рисунок 3.16 — Принципиальная схема на МК Cypress CY8C4245AXI-483.

схема. Между этими системами управления существуют некоторые функциональные отличия. Например, на плате с МК Cypress в формировании напряжения для светодиодного драйвера используется цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) MCP4725, вместо использования ШИМ-сигнала; также применена другая реализация преобразователя сигналов TTL-NIM.

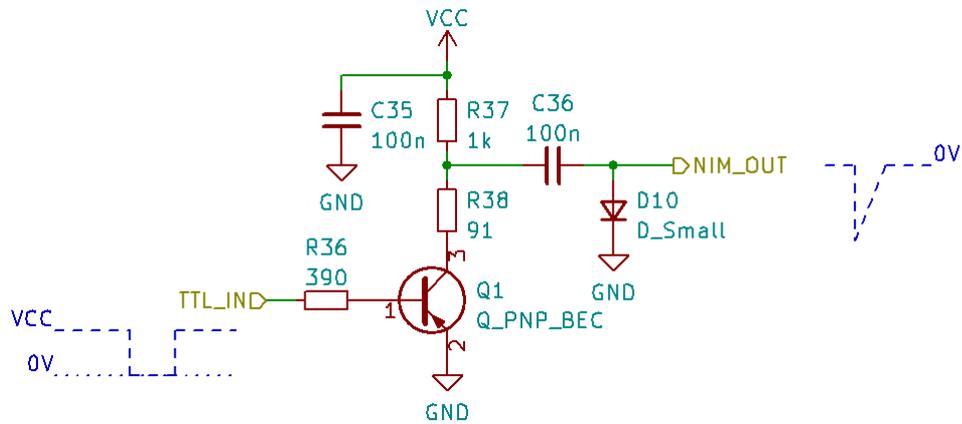


Рисунок 3.17 — Принципиальная схема формирования сигнала синхронизации.

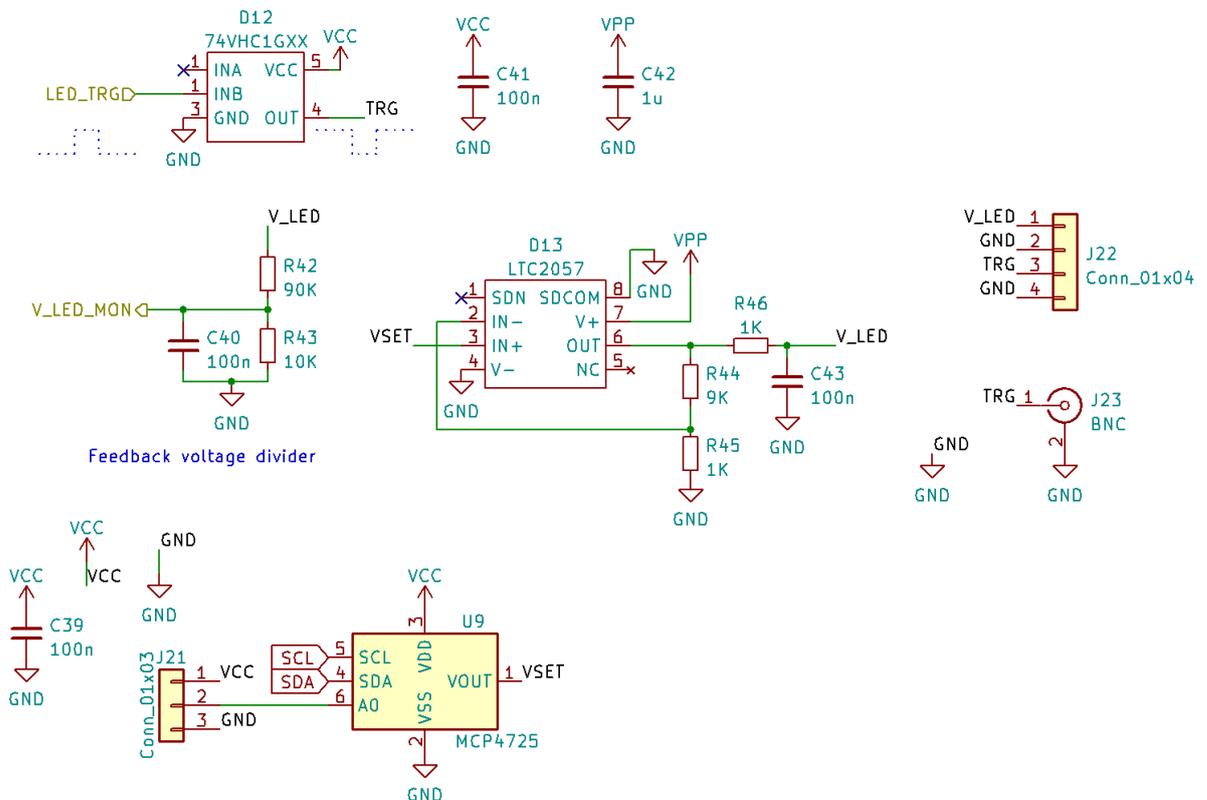


Рисунок 3.18 — Принципиальная схема формирования напряжения и управления светодиодами драйвером.



Рисунок 3.19 — Светодиодный блок на базе МК Cypress CY8C4245AXI-483: а) вид спереди; б) вид сверху без верхней крышки.

Разработанная система позволяет управлять двумя светодиодными драйверами, частота генерации запускающих импульсов для каждого драйвера настраивается независимо друг от друга. Частота следования запускающих импульсов регулируется в диапазон от 2 Гц до 20 кГц, а напряжение подаваемое на светодиодный драйвер может изменяться в пределах от 0 В до 20 В.

При разработке печатной платы была предусмотрена возможность установки Wi-Fi модуля для подключения светодиодного блока к сети Ethernet, что добавляет ещё один способ управления к тем, что были реализованы ранее: либо с лицевой панели устройства, либо посредством USB-соединения, которое имеет гальваническую развязку посредством специализированной микросхемы цифрового изолятора Si8422. В качестве USB-UART моста используется микросхема FT230X.

Существуют два способа осуществления питания данного светодиодного блока: 5 В либо 12 В. Если для второго способа можно использовать соответствующий внешний источник питания, то для первого — USB-порт персонального компьютера, так как ток потребления светодиодного блока составляет менее 500 мА.

Как видно из рис. 3.19, на передней панели устройства находятся дисплей индикации установленных параметров, энкодер с тактовой кнопкой для настройки, два оптических разъёма SMA905/906, два разъёма USB для управления по последовательному соединению, по два выхода синхронизации (с логическими уровнями NIM и TTL) на каждый драйвер, два тумблера быстрого отключения питания от драйверов, один тумблер выбора канала, один

тумблер для выбора между напряжением и частотой генератора и оставшийся тумблер для выбора режима управления устройством.

3.2.4 Изучение временных характеристик светодиодов с соответствующими драйверами

Для измерения длительности световых импульсов применялся стенд, схема которого приведена на рис. 3.20. Путём регулировки напряжения, подаваемого на светодиодный драйвер, достигался однофотозлектронный уровень засветки ФЭУ Philips XP2020. Нахождение в этом режиме контролировалось набором амплитудных/зарядовых спектров на АЦП CAEN N6730. На выходе генератора два синхронизированных между собой сигнала: TTL — для светодиодного драйвера, NIM — как внешний триггерный сигнал для АЦП либо этот сигнал идёт на вход «Старт» БПТ-12А. Формирование сигнала, поступающего на вход «Стоп» БПТ-12А, происходит путём прохождения сигнала от ФЭУ через усилитель, далее усиленный сигнал поступает на дискриминатор, на выходе которого формируется сигнал стандарта NIM. Для время-цифрового преобразователя БПТ-12А ширина канала составляет 75 пс. Величина порога срабатывания дискриминатора устанавливалась на уровне $1/4$ фотоэлектрона.

Для светодиодного драйвера, основанного на комплементарной паре транзисторов VFR92 и VFT92, измерение длительности светового импульса проводились для светодиода GNL-3014VC методом счета коррелированных во времени фотонов с помощью быстродействующего фотоумножителя XP2020. Разброс времени пролета фотоэлектронов при однофотозлектронной засветке фотокатода составляет $\sigma(t) \sim 250$ пс [119]. Спектр излучения светодиода GNL-3014VC, измеренный нами с применением компактного спектрометра S-100, показан на рис. 3.21. Распределение времени пролета фотоэлектронов при однофотозлектронной засветке фотокатода быстродействующего фотоумножителя XP2020 от источника света на основе светодиода GNL-3014VC представлен на рис. 3.22. На этом рисунке показан результат для одного образца светодиода GNL3014VC из измеренной партии в 100 шт. В таблице 1 приведены для примера результаты измерений только 5 образцов светодиодов. Типовое значение длительности светового импульса составляет 1,8 нс (FWHM).

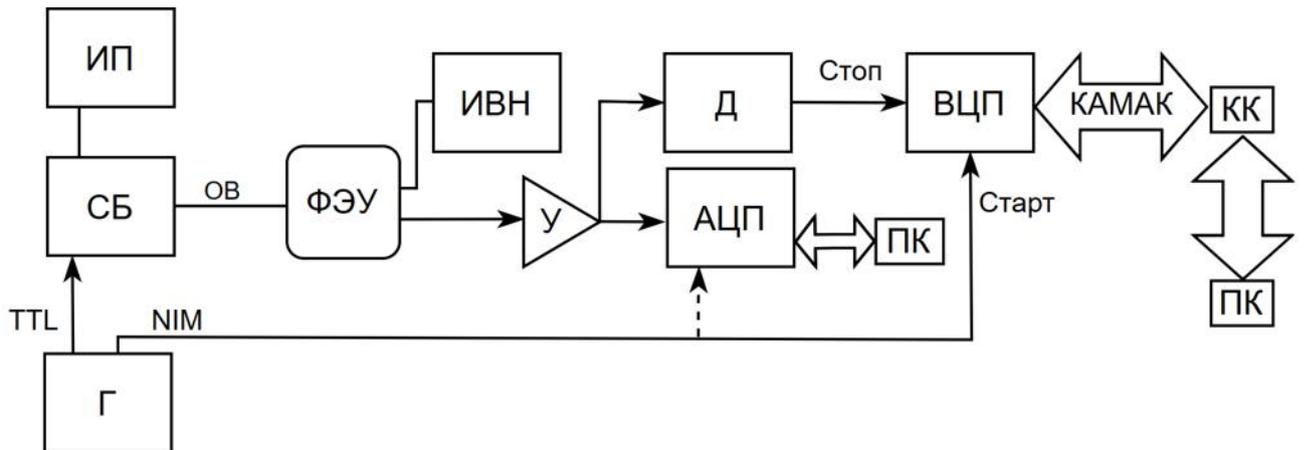


Рисунок 3.20 — Схема стенда по изучению временных характеристик светодиодов. СБ — светодиодный блок (светодиодный драйвер плюс сам светодиод), Г — генератор, ИП — источник питания, ОВ — оптическое волокно, ИВН — источник высокого напряжения, У — усилитель LeCroy 612A, АЦП — аналого-цифровой преобразователь CAEN N6730, Д — дискриминатор LeCroy 623, ВЦП — время-цифровой преобразователь БПТ-12А, КК — крейтконтроллер, ПК — персональный компьютер.

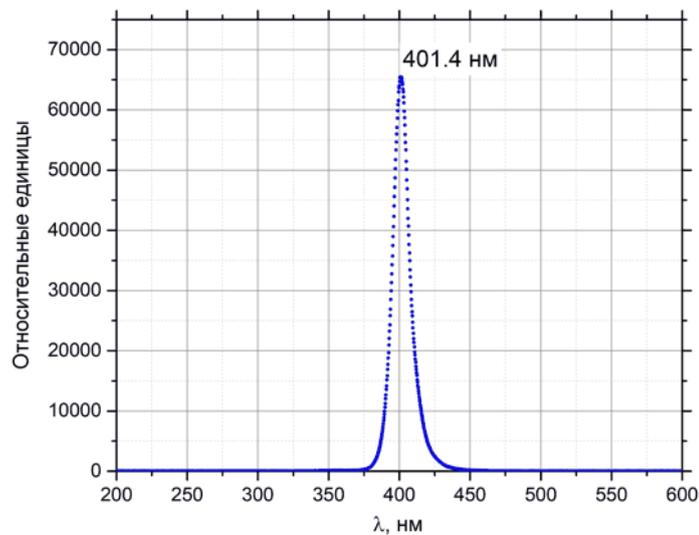


Рисунок 3.21 — Спектр излучения GNL-3014VC. Измерение в режиме постоянного тока $I = 20$ мА.

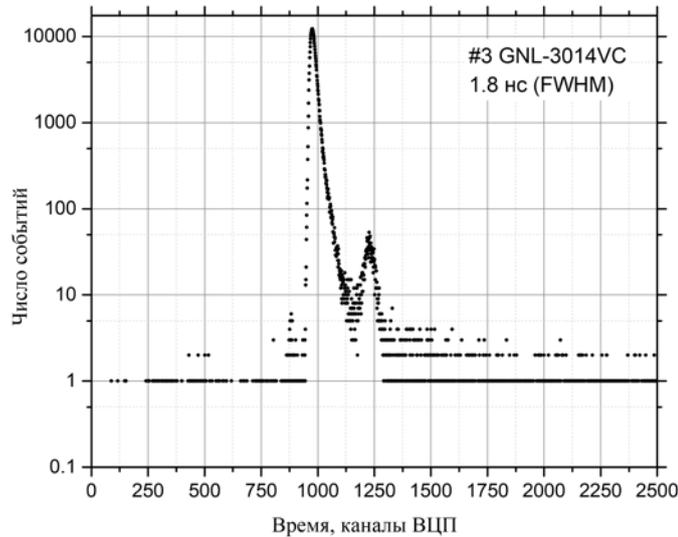


Рисунок 3.22 — Длительность светового импульса для GNL-3014VC.

Таблица 1 — Полная ширина на половине высоты распределения времени пролета фотоэлектронов при однофотоэлектронной засветке фотокатода фотоумножителя XP2020, измеренное с помощью источника света на основе светодиода GNL-3014VC.

№	τ_{pulse} (FWHM), нс
1	1.9
2	1.8
3	1.8
4	2.0
5	2.0

3.2.5 Светодиодный модуль для калибровки прототипов ББНТ

При возникновении сцинтилляционного события сигналы считываются со всех 20-ти ФЭУ полутонного детектора. В таком случае необходимо установить одинаковый коэффициент усиления на всех ФЭУ. Для этой задачи применялся светодиодный драйвер (описанный в пункте 2.3) подключенный к диффузно-рассеивающему шару посредством оптоволоконного кабеля с сердечником из полиметилметакрилата (ПММА). Запуск драйвера осуществлялся с помощью внешнего генератора импульсов. Шар имеет стеклянную оболочку толщиной 1 мм. Оболочка заполнена смесью из силикона SilGel Wacker 612A и порошка

из полых стеклянных сфер (\varnothing 50 мкм) маркировки S32. Подобные диффузные шары применялись в эксперименте SNO [31; 134].

С помощью системы утяжелителей и нейлоновых нитей (\varnothing 0.3 мм) диффузная сфера размещалась в центре акриловой сферы. Далее по зарядовому спектру однофотозлектронных импульсов определялось рабочее напряжение фотоумножителя, обеспечивающее усиление $G = 10^7$ (3.23).

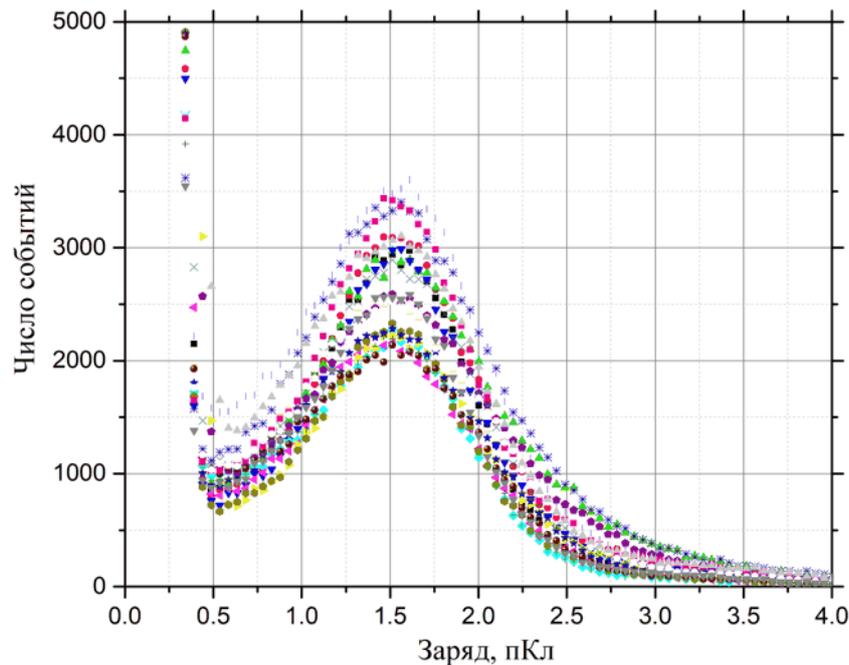


Рисунок 3.23 — Зарядовые спектры однофотозлектронных импульсов 20-ти образцов фотоумножителей R7081-100 WA полутонного прототипа ББНТ.

3.3 Калибровка радиоактивными источниками полутонного прототипа ББНТ

После проведения калибровки усиления для всех ФЭУ, необходимо определить энергетический отклик детектора для понимания того, какую частицу удалось зарегистрировать. Для определения энергетического отклика детектора радиоактивный источник размещался в геометрическом центре детектора (рис. 3.24), после чего были зарегистрированы соответствующие зарядовые спектры. В качестве источников использовались образцовые спектрометрические

гамма-источники (ОСГИ): ^{109}Cd ($T_{1/2} = 461.9$ сут), ^{22}Na ($T_{1/2} = 2.6018$ лет), ^{133}Ba ($T_{1/2} = 10.551$ лет), ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30.08$ лет), ^{60}Co ($T_{1/2} = 1925.28$ сут). Активность источников была не менее 20 кБк (для ^{22}Na), что существенно выше, чем скорость счёта фоновых событий. Источники имеют форму цилиндра высотой 3 мм, диаметром 25 мм. Чтобы расположить радиоактивный источник в центре детектора был разработан прозрачный акриловый контейнер (рис.3.25). Контейнер состоит из двух частей, с внутренней полостью диаметром 26 мм и высотой 4 мм. Две акриловые части контейнера скрепляются болтовыми соединениями в трёх точках. Предварительные тесты показали, что такое соединение обеспечивает полную герметичность внутренней полости. К верхней части контейнера закрепляется циркониевая трубка, которая с другой стороны крепится к верхнему фланцу акриловой сферы.

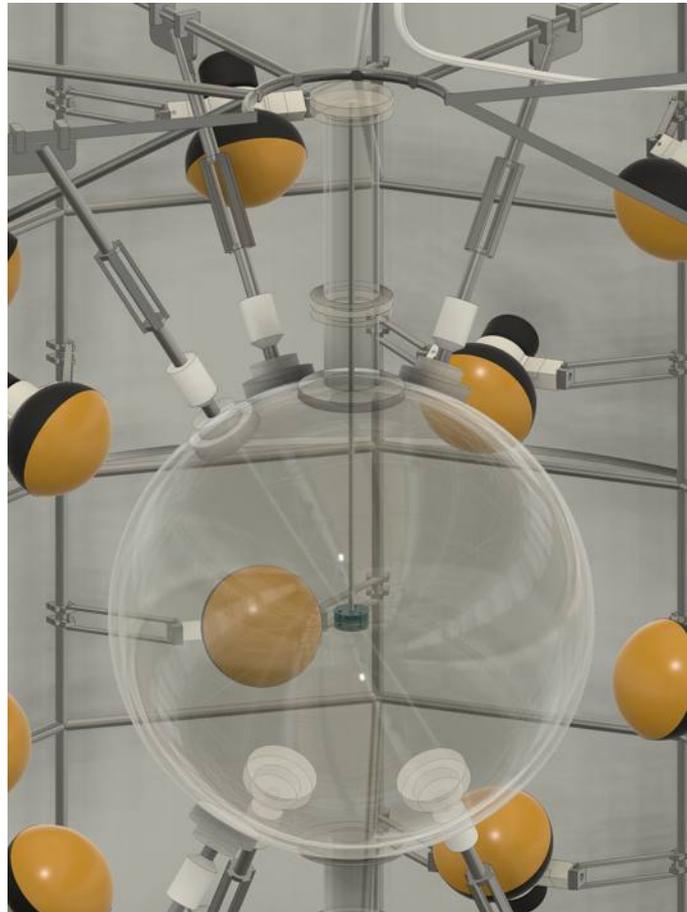


Рисунок 3.24 — Расположение контейнера с радиоактивным источником внутри акриловой сферы детектора.

По результатам калибровочных измерений получены энергетические спектры, приведенные на рис. 3.26 [98].

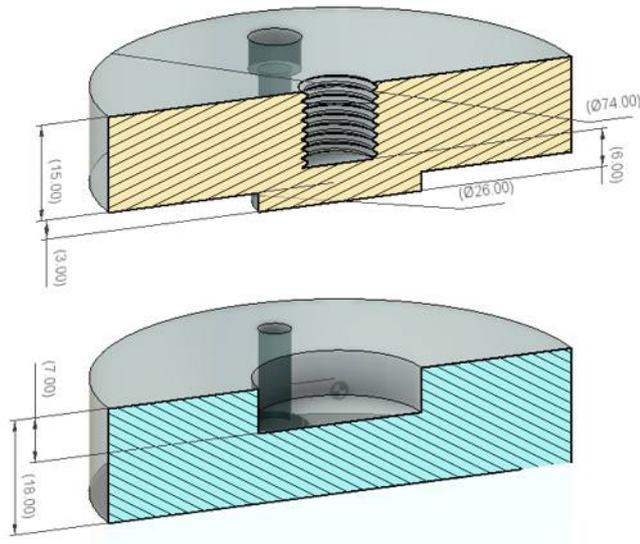


Рисунок 3.25 — Акриловый контейнер для радиоактивного источника, верхняя и нижняя части.

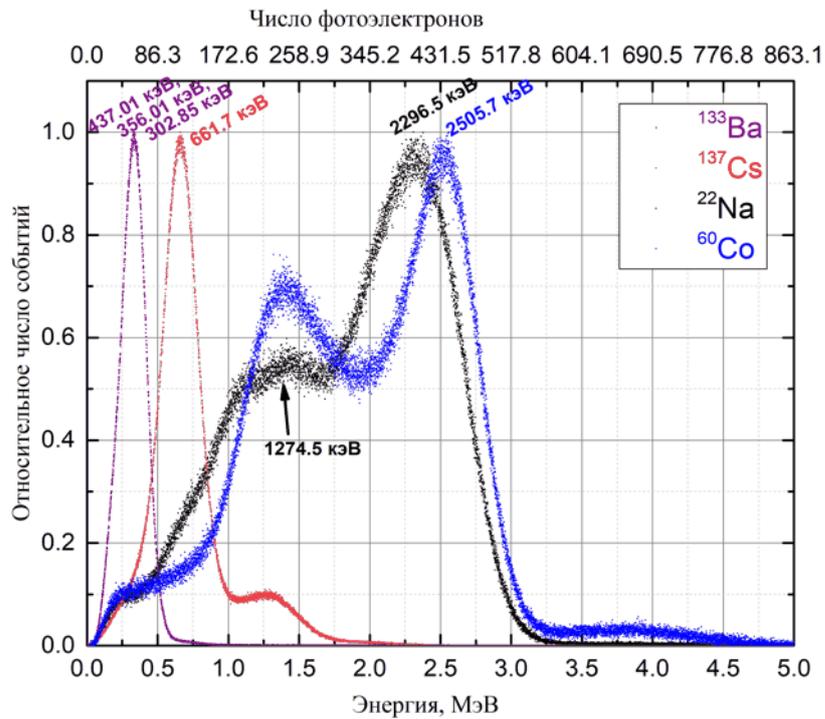


Рисунок 3.26 — Энергетические спектры сигналов детектора от радиоактивных источников.

Для ^{133}Ba происходит электронный захват с образованием ^{133}Cs , который при переходе в стабильное состояние испускает целый спектр γ -квантов. Наибольший вклад дают γ -кванты с энергиями 356.01 кэВ (62.05 %), 302.85 кэВ (18.34 %), 81 кэВ (32.9 %).

При β -распаде ^{137}Cs в 94.7 % образуется ^{137}Ba в возбуждённом состоянии, который с вероятностью 85.1 % испускает γ -кванты с энергией 661.66 кэВ [135].

^{109}Cd в результате электронного захвата образует ^{109}Ag , который при переходе в стабильное состояние испускает γ -квант с энергией 88.03 кэВ.

^{22}Na распадается и через электронный захват, и через β^+ -распад. Образовавшийся при этом ^{22}Ne в возбужденном состоянии при переходе в основное состояние испускает γ -квант с энергией 1274.54 кэВ. Позитрон, возникший при β^+ -распаде, аннигилирует с образованием двух γ -квантов, каждый с энергией 511 кэВ.

На рис. 3.26 видно, что для ^{137}Cs и ^{60}Co присутствуют пики от наложенных событий, что объясняется относительно высоким уровнем радиоактивности источников, 805 кБк и 319 кБк, соответственно.

При β^- -распаде ^{60}Co образуется изомер ^{60}Ni . Время жизни возбужденного состояния, когда ^{60}Ni может излучить γ -квант с энергией 1173.23 кэВ, составляет 3.3 пс, а для γ -кванта с энергией 1332.49 кэВ это значение равно 0.9 пс. Это объясняет наличие в спектре на рис. 3.26 пика на $(1173.23 + 1332.5)$ кэВ.

Для γ -квантов с энергиями 1173.23 кэВ, 1332.49 кэВ (от ^{60}Co) и 1274.53 кэВ (^{22}Na) наблюдается комптоновское рассеяние с комптоновским краем, характеризующим максимальное количество энергии, которое можно передать электрону в сцинтилляторе, равным 963.41 кэВ, 1118.1 кэВ, 1061.7 кэВ, соответственно. По результатам калибровки радиоактивными источниками был определён энергетический отклик детектора, который составил ≈ 172.6 фотоэлектронов/1 МэВ.

По результатам проведенных калибровок с использованием радиоактивных источников можно получить следующие данные (на рис. 3.27).

Зависимость удельного световыхода dL/dx жидких сцинтилляторов от удельных потерь заряженной частицы хорошо описывается формулой Биркса [136]:

$$\frac{dL}{dx} = \frac{S \frac{dE}{dx}}{1 + kB \frac{dE}{dx}}, \quad (3.1)$$

где L — световыход сцинтиллятора; S — эффективность сцинтилляции; kB — коэффициент Биркса.

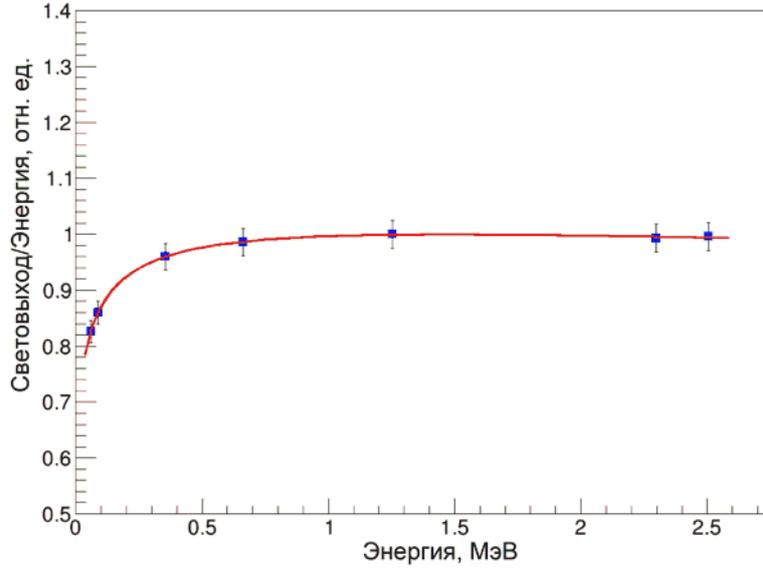


Рисунок 3.27 — Зависимость отношения световыхода к энергии электронов для жидкого сцинтиллятора полутонного прототипа ББНТ от энергии электронов.

Формула Биркса хорошо учитывает эффект гашения сцинтилляционного излучения. Разделив обе частицы формулы (3.1) на dE/dx получим:

$$\frac{dL}{dE} = \frac{S}{1 + kB \frac{dE}{dx}}. \quad (3.2)$$

Удельные потери энергии для электрона зависят логарифмически от энергии:

$$dE/dx \approx \ln E. \quad (3.3)$$

Подставляя (3.3) в (3.2), получаем:

$$f(E) = \frac{dL}{dE} = \frac{S}{1 + kB \ln E}. \quad (3.4)$$

На рис. 3.27 показана измеренная зависимость световыхода (полутонного прототипа ББНТ от энергии гамма-квантов. Уменьшение световыхода жидкого сцинтиллятора прототипа при уменьшении энергии гамма-квантов в области энергий меньше 100 кэВ объясняется гашением сцинтилляционного излучения из-за увеличения плотности ионизации, приводящее к самогашению ионизационного возбуждения среды [137].

Фитируя экспериментальные данные функцией $f(E)$ с параметрами S и kB определяем значение коэффициента Биркса kB :

$$kB = 0.016 \pm 0.001 \text{ gMeV}^{-1} \text{ cm}^{-2}. \quad (3.5)$$

Полученное значение коэффициента Биркса хорошо согласуется с данными других измерений [138—140].

Заключение к Главе 3

1. Разработана и создана калибровочная система на основе ультраярких светодиодов, оптоволоконных кабелей и диффузных рассеивателей света для полутонного прототипа проекта Баксанского большого нейтринного телескопа.
2. С помощью разработанной системы проведена калибровка всех фотоумножителей полутонного прототипа проекта Баксанского большого нейтринного телескопа. Установлены рабочие напряжения фотоумножителей, соответствующие усилению $G = 10^7$.
3. Разработана и создана калибровочная система с радиоактивными источниками гамма-излучения для прототипа полутонного Баксанского большого нейтринного телескопа. С помощью разработанной системы проведены калибровочные измерения полутонного прототипа. Получена энергетическая шкала установки. Измерена зависимость световыхода установки от энергии гамма-квантов. Получено значение коэффициента Биркса: $k_B = 0.016 \pm 0.001 \text{ gMeV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$.

Глава 4. Вето детектор эксперимента BabyIAXO

4.1 Эксперименты IAXO и BabyIAXO

Аксион – это гипотетическая частица, введенная для решения так называемой «сильной CP-проблемы». Квантовая хромодинамика (КХД) не запрещает нарушение CP-симметрии. В лагранжиане КХД существует нарушающее CP-симметрию Θ -слагаемое. Малость Θ -слагаемого, а возможно и его нулевое значение, является по сути другой формулировкой «сильной CP-проблемы». Более того, это слагаемое связано с электрическим дипольным моментом нейтрона d_n [141; 142] следующим соотношением:

$$d_n < 3.6 \times 10^{-16} \Theta e \cdot \text{см}. \quad (4.1)$$

Учитывая то, что экспериментальный предел на значение электрического дипольного момента нейтрона составляет:

$$d_n < 1.8 \times 10^{-26} e \cdot \text{см}. \quad (4.2)$$

Получим ограничение и на значение Θ :

$$\Theta < 5 \times 10^{-11}. \quad (4.3)$$

Так почему же Θ так мал, хотя это свободный параметр, который может иметь значение от 0 до 2π ? Роберто Печчеи и Хелен Квинн в 1977 году предложили решение этой проблемы введением дополнительной киральной симметрии $U_{PQ}(1)$, которая сводит к нулю Θ -слагаемое КХД лагранжиана спонтанным нарушением этой симметрии (PQ-симметрии) [143]. Стивен Вайнберг [144] и Франк Вильчек [145] в 1978 году показали, что нарушение этой симметрии приводит к появлению новой частицы, которую Франк Вильчек назвал аксионом.

На сегодняшний день различают адронный аксионы (KSVZ-аксионы) [146] и аксионы теории Великого Объединения (GUT- или DSFZ-аксионы) [147; 148]. Существуют также некоторые расширения Стандартной Модели (например, теория струн), предсказывающие существование так называемых аксионо-подобных частиц. И аксионы и аксионо-подобные частицы — хорошие

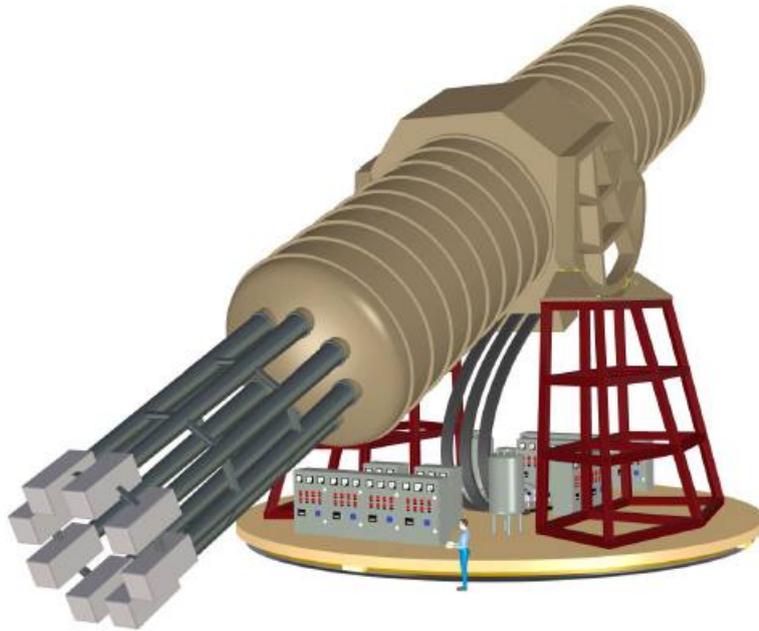


Рисунок 4.1 — Эскиз эксперимента IAXO [150].

кандидаты на гипотетические частицы темной материи. Аксионы и аксионоподобные частицы могут образовываться в огромных количествах в центре Солнца. Поиск потоков таких частиц от Солнца активно велся в последние десять лет экспериментом CAST [149] в ЦЕРНе.

Международная Аксионная Обсерватория (International Axion Observatory - IAXO) [150] – проект эксперимента с чувствительностью на 5 порядков превышающей чувствительность эксперимента CAST активно разрабатывается в настоящее время коллаборацией из 25 институтов из 10 стран. На рис. 4.1 показан эскиз эксперимента IAXO. Как промежуточный экспериментальный этап эксперимента IAXO разрабатывается в настоящее время проект BabyIAXO [151].

Установка BabyIAXO (рис. 4.2) 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 $g_{a\gamma}$ до $\sim 1.5 \times 10^{-11} \text{ ГэВ}^{-1}$ и масс аксионов до 0.25 эВ, захватывая область КХД-аксионов [150; 151], рис. 4.3. Установка BabyIAXO будет располагаться в экспериментальном комплексе DESY в Гамбурге.

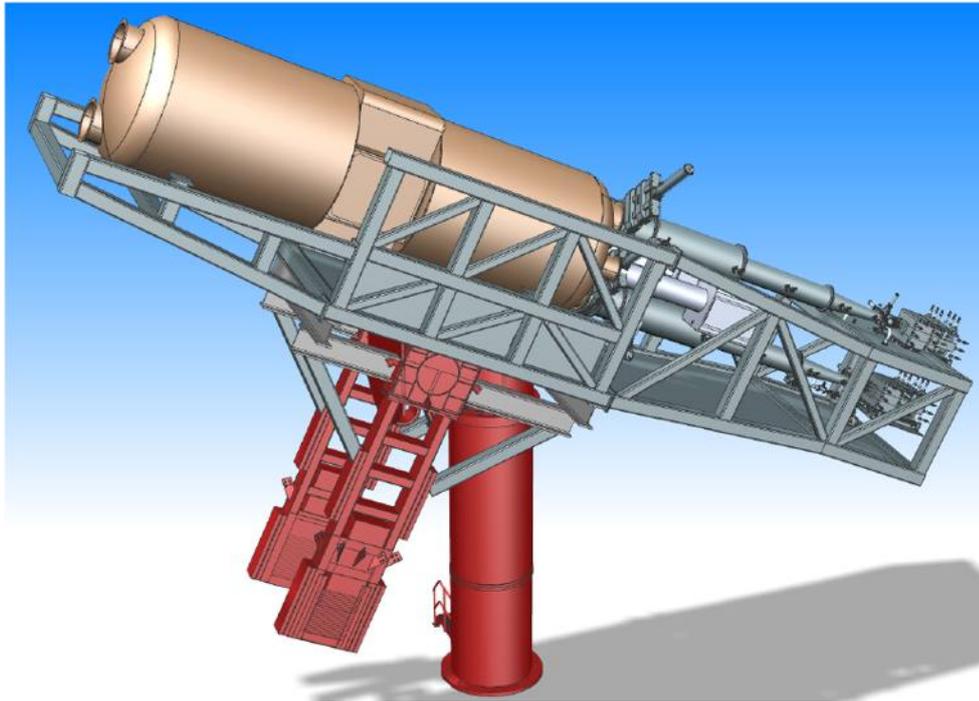


Рисунок 4.2 — Эскиз эксперимента BabyIAXO [151].

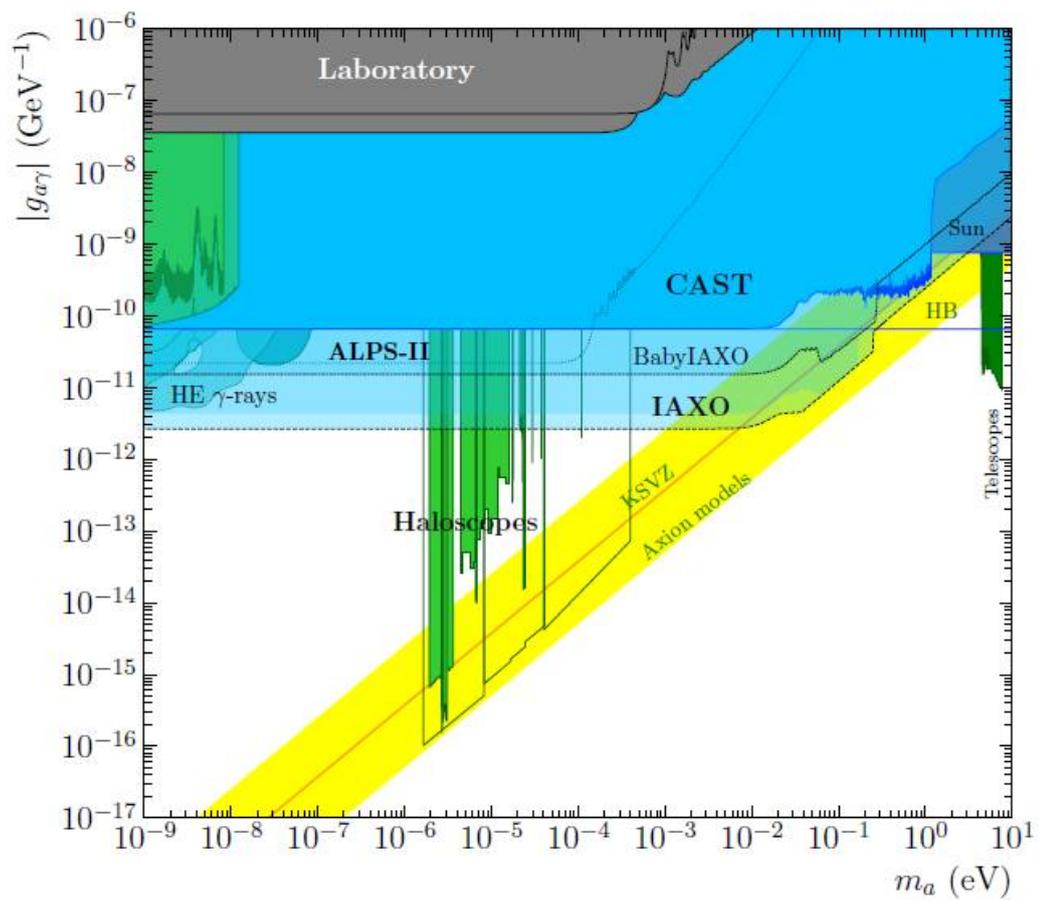


Рисунок 4.3 — Чувствительности экспериментов BabyIAXO и IAXO [151].

Для отработки детекторных систем, в качестве первого этапа проекта BabyIAXO, коллаборацией IAXO создается установка IAXO-D0. 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 одной 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 [151], а катод TPC направлен на канал магнита, где аксионы конвертируются в рентгеновские фотоны. Объем камеры, в котором происходит преобразование рентгеновских фотонов, должен с одной стороны обеспечить высокую эффективность остановки фотонов, а с другой — обеспечить и минимальный фон. Обычно это камера толщиной 3 см, наполненная аргоном под давлением 1.4 бар с небольшой ($\sim 2\%$) добавкой изобутана для тушения.

Детекторная система установки IAXO-D0 плотно обложена пассивной защитой из свинца, рис. 4.4. Пассивная защита должна быть окружена активной вето системой со всех сторон.



Рисунок 4.4 — Детекторная система IAXO-D0 пассивной свинцовой защите [149].

4.2 Детектор мюонного вето эксперимента BabyIAХО

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. В силу ограниченного бюджета нами было предложено использовать пластиковые сцинтилляторы из старых, уже закончивших свою работу экспериментов. Выбор пал на пластиковые сцинтилляционные детекторы, разработанные в университете г. Тюбинген [152] и использовавшиеся в эксперименте МАМІ в ускорительном комплексе в г. Майнц, Германия. Сцинтилляционные детекторы этого эксперимента были выполнены из пластикового (полистирольного) сцинтиллятора NE102 размером $5 \times 20 \times 300$ см³. Все стороны сцинтилляционных пластин полированы. На рис. 4.5 показаны эти сцинтилляционные пластины, хранившиеся в университете г. Тюбинген. В общей сложности в нашем распоряжении оказались 130 сцинтилляционных пластин. Торцы пластин оптически соединены с помощью световодов из полиметилметакрилата (ПММА) с фотоумножителями XP2312В. Фотография одного такого фотоумножителя представлена на рис. 4.6. В левой части этого рисунка можно видеть фотографию делителя напряжения питания.



Рисунок 4.5 — Пластиковые сцинтилляционные детекторы эксперимента на хранение в университете г. Тюбинген.

Несмотря на то, что все сцинтилляционные пластины, фотоумножители и световоды сохранились без механических повреждений, оптические соединения фотоумножителей и световодов к пластинам были повреждены. Поэтому все фотоумножители, световоды и сцинтилляционные пластины были отделены друг от друга. Их рабочие поверхности были очищены от остатков оптического клея. Толщина сцинтилляционных пластин (5 см) достаточна для эффективной



Рисунок 4.6 — Фотоумножитель ХР2312В и его делитель напряжения питания.

регистрации внешнего излучения. Сцинтилляторы необходимой длины (70 см) были вырезаны механически из пластин с жестким контролем температуры для того, чтобы избежать оплавления сцинтилляторов. Торцевые поверхности полировались в лабораторных условиях с использованием оптической пасты ГОИ.

Большое время жизни сцинтилляционных пластин и их длительное хранение в различных условиях окружающей среды продиктовало необходимость отбора пластин для наших нужд. На самом первом этапе работ было исследовано физическое состояние пластин. Визуальное обследование пластин показало, что разброс состояния пластин довольно большой. Около 70 % пластин имеют желтоватый цвет. Возможным объяснение пожелтения пластиковых сцинтилляторов может быть присутствие мономера, оставшегося после процесса полимеризации [153]. На рис. 4.7 можно увидеть цветовые различия некоторых образцов исследованных пластин. Следует отметить, что такие цветовые различия были обнаружены даже в пределах одной пластины. Поэтому для наших целей вырезались сцинтилляторы необходимого размера, имеющие однородную синюю окраску.

Для тестирования, отбора и исследования параметров фотоумножителей ХР2312В был разработан и создан измерительный стенд, функциональная схема которого показана на рис. 4.8. Протестировано в общей сложности 260 фотоумножителей ХР2312В из состава сцинтилляционных пластин. Более 90 %

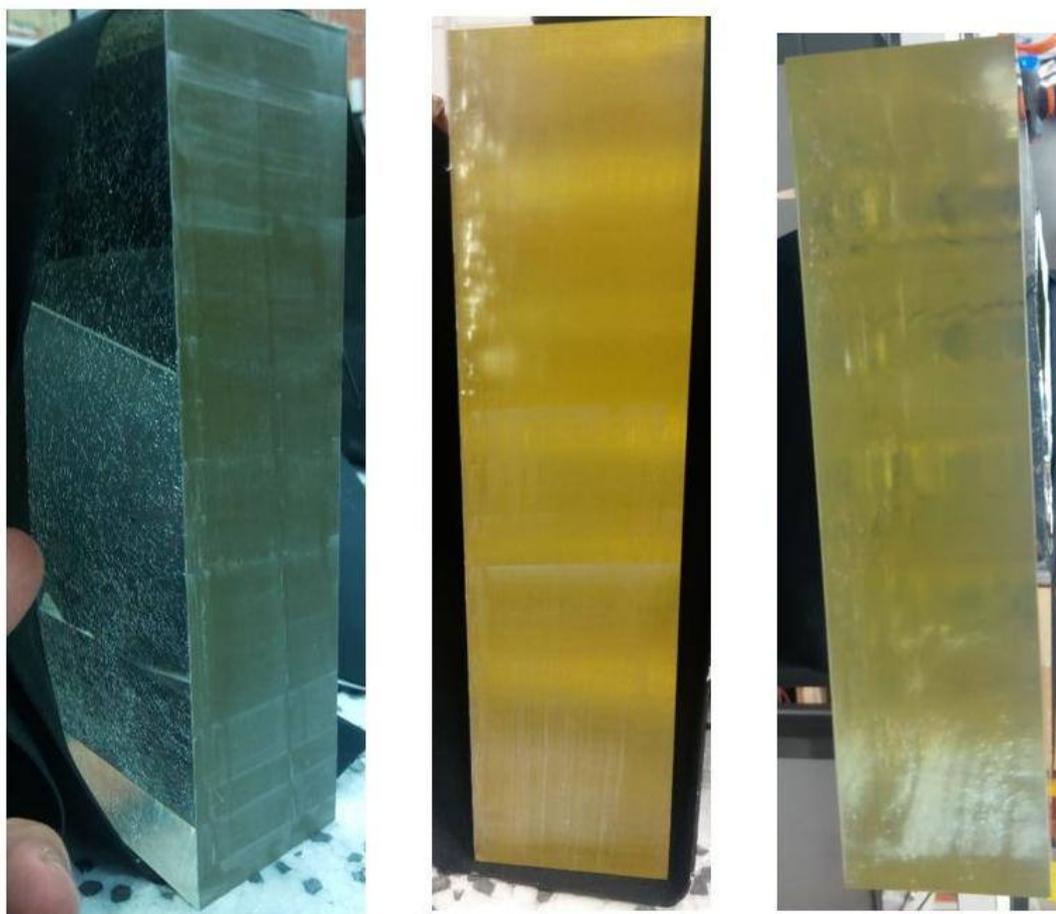


Рисунок 4.7 — Фотографии торцов сцинтилляционных пластин с различной окраской.

(237 штук) фотоумножителей при визуальном осмотре были в удовлетворительном состоянии. Единственным критерием при визуальном осмотре было наличие фотокатода. Полновесный же отбор фотоумножителей на измерительном стенде проводился по следующим параметрам:

1. Стабильная работа при усилении 10^6 ;
2. Коэффициент усиления 10^6 достигается при напряжения питания не более 2100 В;
3. Квантовая эффективность фотокатода на длине волны 430 нм более 20 %. Измерялась относительная чувствительность с использованием реперных калиброванных фотоумножителей ЕТ9302В и ФЭУ-184;
4. Скорость счета импульсов темнового тока не превышает 10 кГц при усилении 10^6 и уровне дискриминации сигналов $\sim 0.25Q_{1pe}$, где Q_{1pe} — это средний заряд однофотозлектронного импульса;
5. Уровень послеимпульсов не должен превышать 5 % на один фотозлектрон.

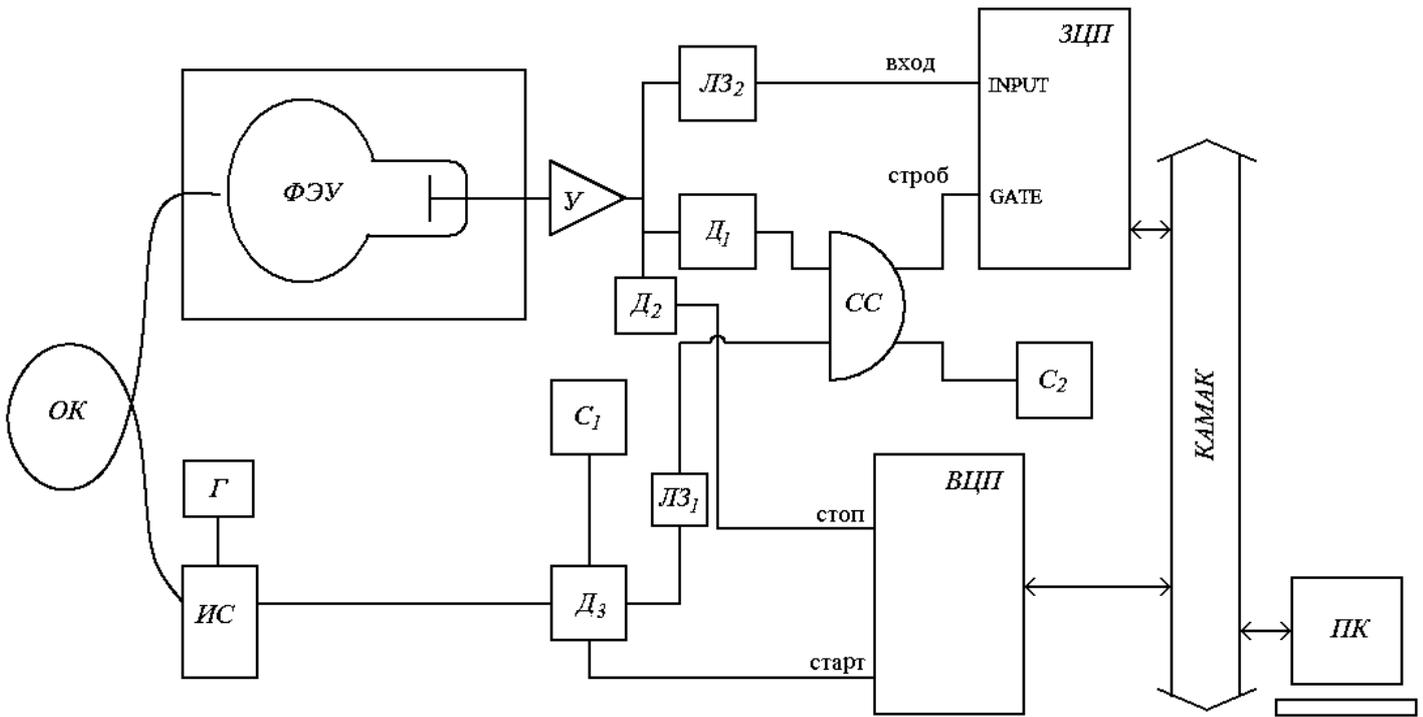


Рисунок 4.8 — Функциональная схема измерительного стенда для тестирования, отбора и исследования параметров фотоумножителей детектора вето эксперимента BabyIAXO. ФЭУ — исследуемый фотоумножитель XR2312B; ОК — оптоволоконный кабель Comar 01 FS 20; ИС — быстродействующий источник световых импульсов; Г — генератор импульсов; У — усилитель импульсов; Д₁, Д₂ и Д₃ — дискриминаторы импульсов; С₁ и С₂ — счетчики импульсов; ЛЗ₁ и ЛЗ₂ — кабельные линии задержки; СС — схема совпадений LeCroy 621AL; ЗЦП — зарядово-цифровой преобразователь LeCroy 2249W; ВЦП — время-цифровой преобразователь БПТ-12А; ПК — персональный компьютер.

По результатам тестирования и исследования параметров отобраны более 190 фотоумножителей, что на много превышает необходимое количество фотоумножителей для детектора вето прототипа BabyIAXO.

На рис. 4.9 — 4.11 показаны типичные зависимости квантовой эффективности от длины волны, зарядовое и временное распределения однофотозлектронных импульсов отобранных фотоумножителей. Все отобранные фотоумножители обладают хорошей чувствительностью. Квантовая эффективность фотокатодов всех отобранных фотоумножителей превышает 20 % на длине волны 350-470 нм со средним значением $\sim 23 - 24$ %, рис. 4.9. В зарядовых спектрах однофотозлектронных импульсов наблюдается хороший пик с отношением пик/долина > 2.5 , рис. 4.10.

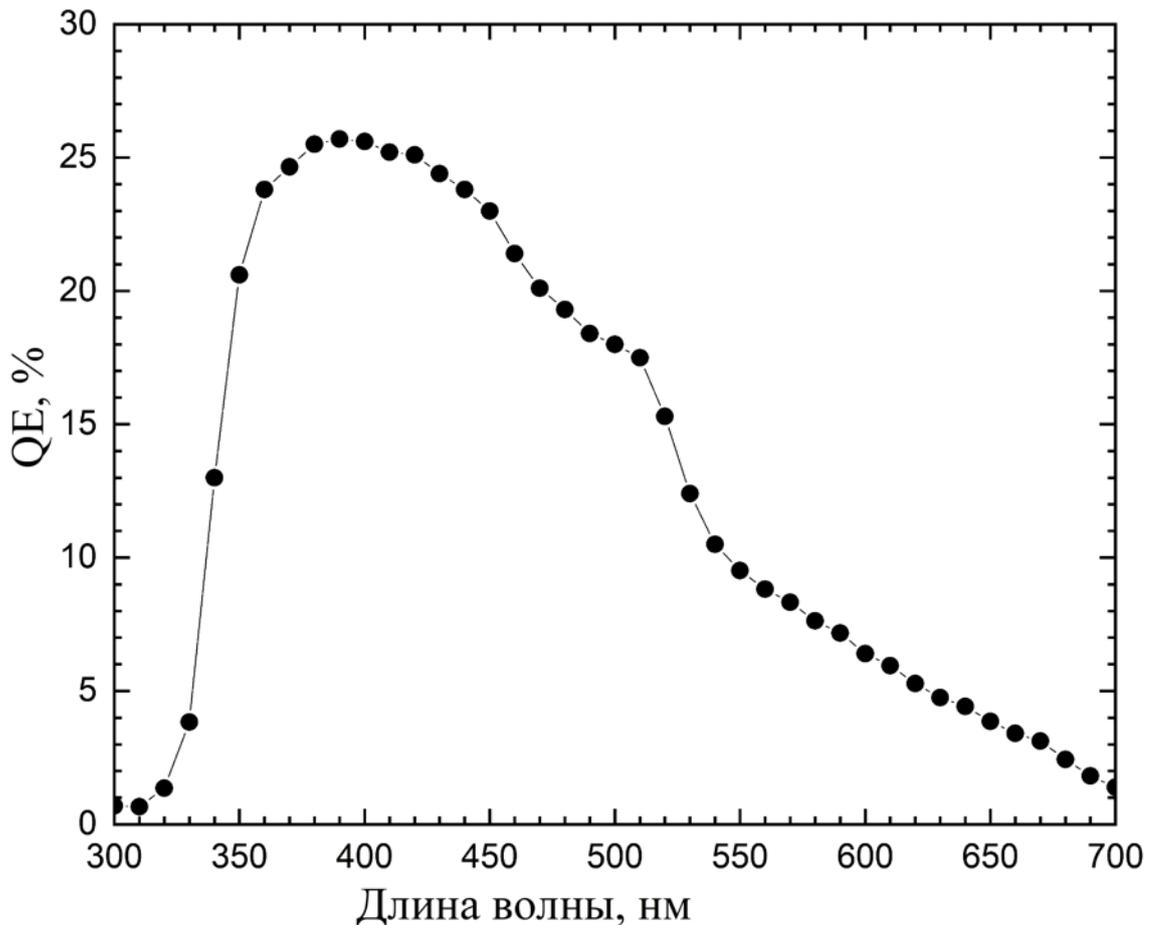


Рисунок 4.9 — Измеренная типовая зависимость квантовой эффективности фотокатода отобранных фотоумножителей XP2312B.

Размеры сцинтилляционных пластин вето детектора – $5 \times 20 \times 70$ см³. 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 3M.

Детектор вето представляет собой 6 стенок из сцинтилляционных детекторов. Каждая стенка состоит из 3 сцинтилляционных пластин, каждая из которых просматривается одним фотоумножителем XP2312B. Только одна пластина разделена на две части длиной 25 см каждая. Таким образом сделан технологический выход для детекторной системы. Сборочный чертеж детектора вето показан на рис. 4.12.

Для измерения отклика индивидуального сцинтилляционного детектора на мюон космических лучей был создан измерительный стенд, функциональная схема которого представлена на рис. 4.13. Мюонный телескоп состоящий из двух пластиковых сцинтилляционных счетчиков S1 и S2 размером $3 \times 12 \times 12$ см³

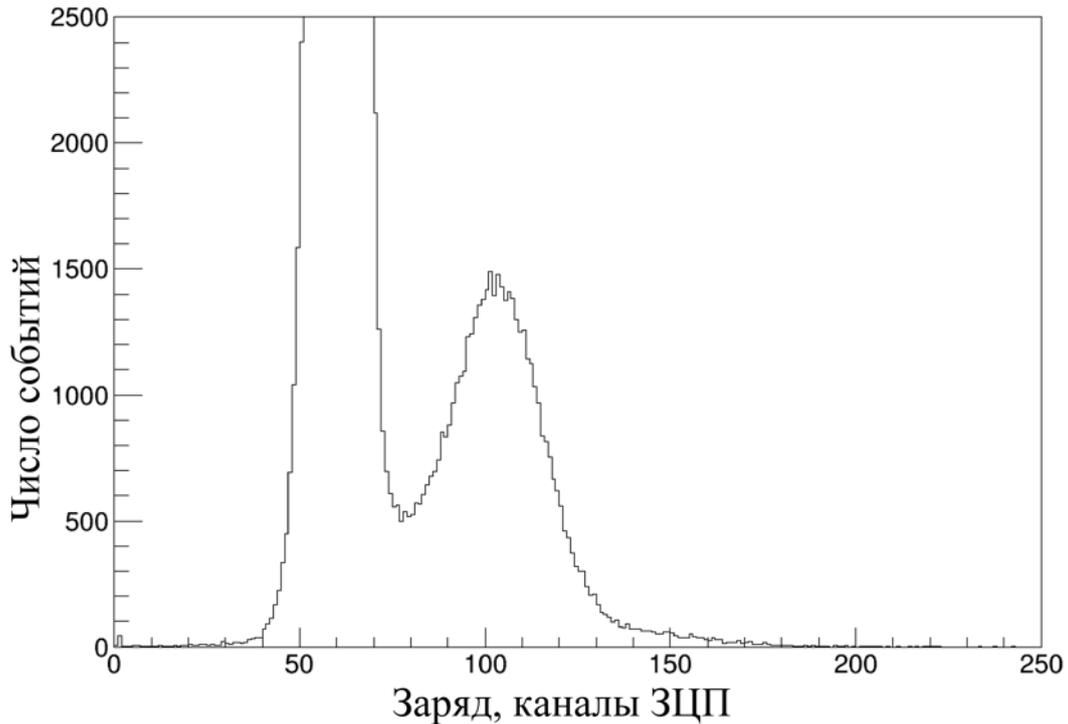


Рисунок 4.10 — Типичное зарядовое распределение однофотоэлектронных импульсов фотоумножителей XP2312В.

каждый [153]. Считывание сцинтилляционного сигнала в этих счетчиках производится с помощью спектросмещающих оптоволоконных кабелей Kuraray Y11 (200) и кремниевых фотоумножителей SiPM1 и SiPM2 с чувствительной площадью $1.28 \times 1.28 \text{ мм}^2$ производства СРТА, г. Москва. Измерение зарядового распределения выходных сигналов исследуемой сцинтилляционной пластины S осуществляется с помощью зарядово-цифрового преобразователя QDC (LeCroy 2249W), синхронизированного выходными сигналами схемы совпадений CU (LeCroy 621L).

На рис. 4.14 представлен зарядовый спектр событий отклика сцинтилляционной пластины на мюон космических лучей. В зарядовом спектре наблюдается четкий пик, обусловленный прохождением мюона космических лучей через пластину. Эффективность регистрации мюонов составляет 99,97 %.

Контроль стабильности параметров сцинтилляционных детекторов вето детектора осуществляется при помощи разработанной нами светодиодной калибровочной системы, блок-схема которого показана на рис. 4.15. Данная система состоит из 5 четырехканальных быстродействующих светодиодных источников света LED1-5 аналогичных, описанным источникам в предыдущих главах диссертации, и оптоволоконных кабелей ОК Comar 0.1 FS 20

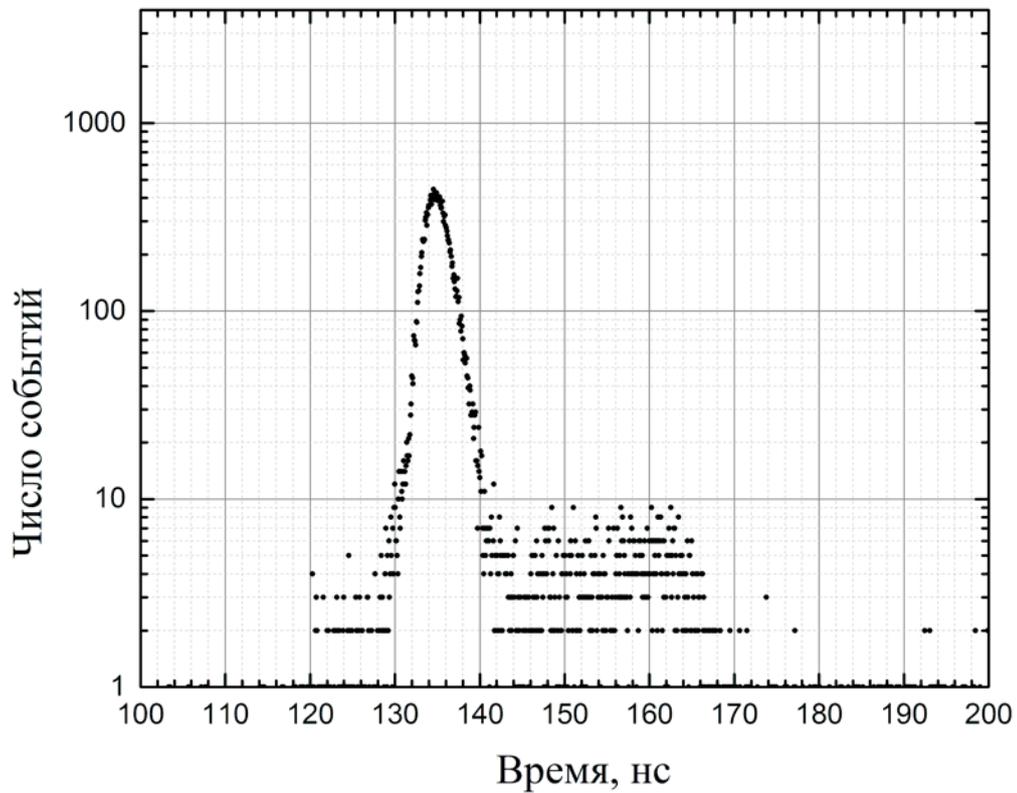


Рисунок 4.11 — Типичное распределение времен пролета фотоэлектронов при однофотоэлектронной засветке фотокатода фотоумножителей XR2312B.

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.

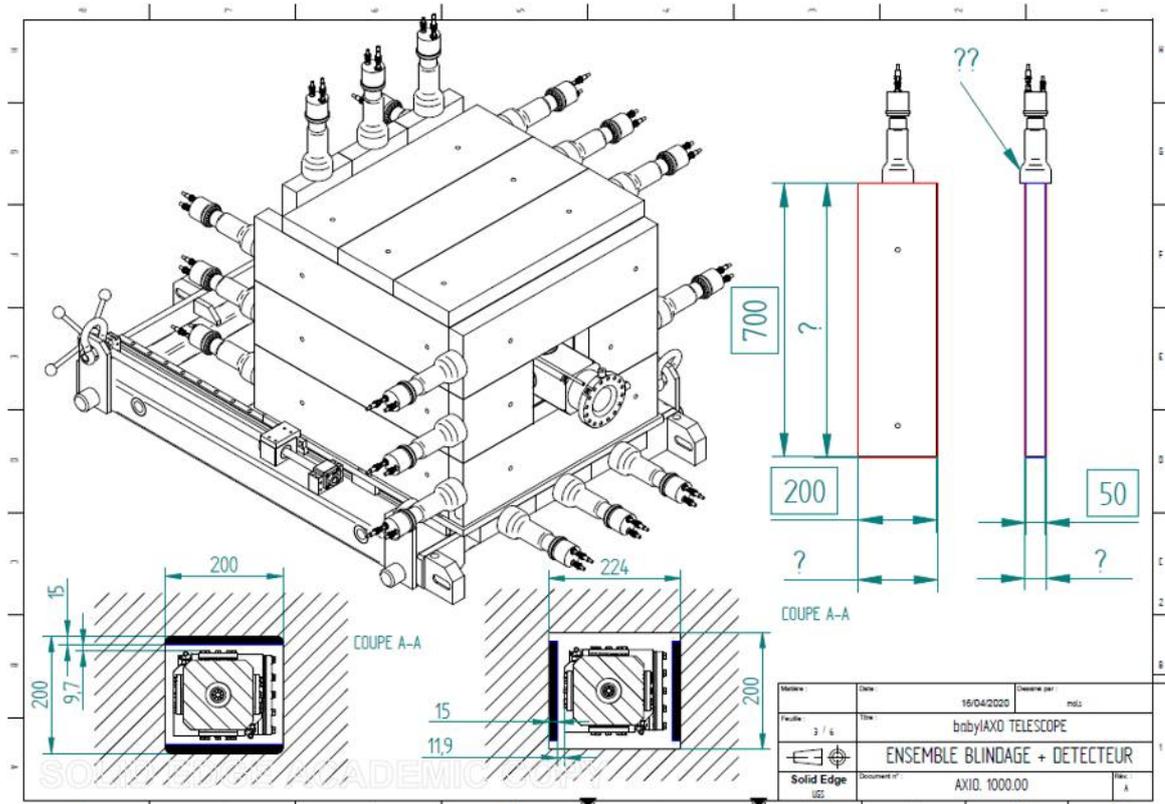


Рисунок 4.12 — Эскиз детектора вето эксперимента BabyIAXO.

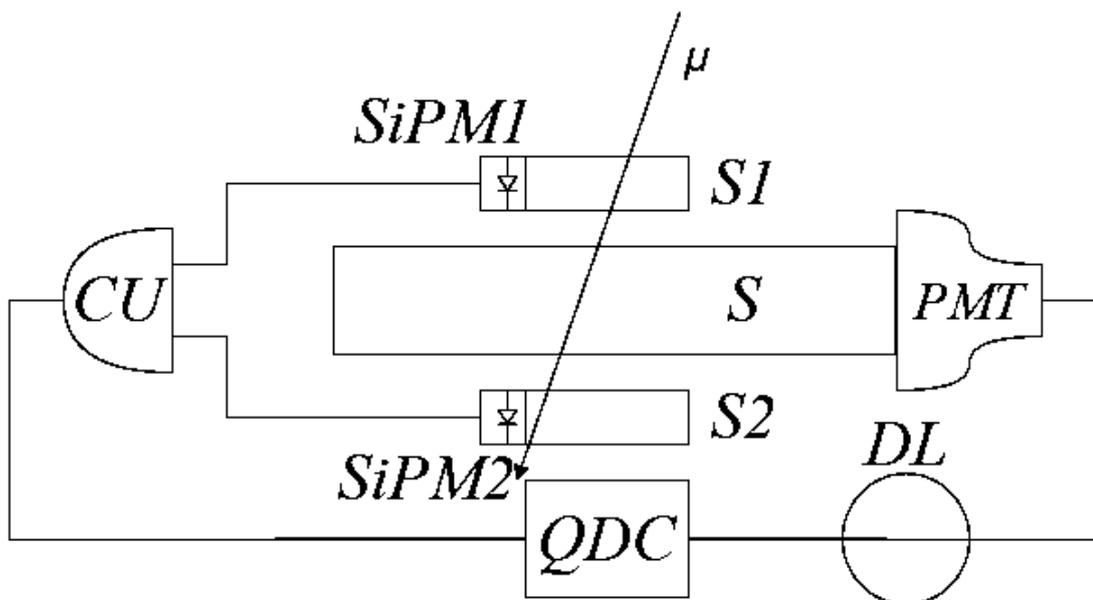


Рисунок 4.13 — Функциональная схема измерительного стенда для исследования отклика сцинтилляционных детекторов на мюоны космических лучей.

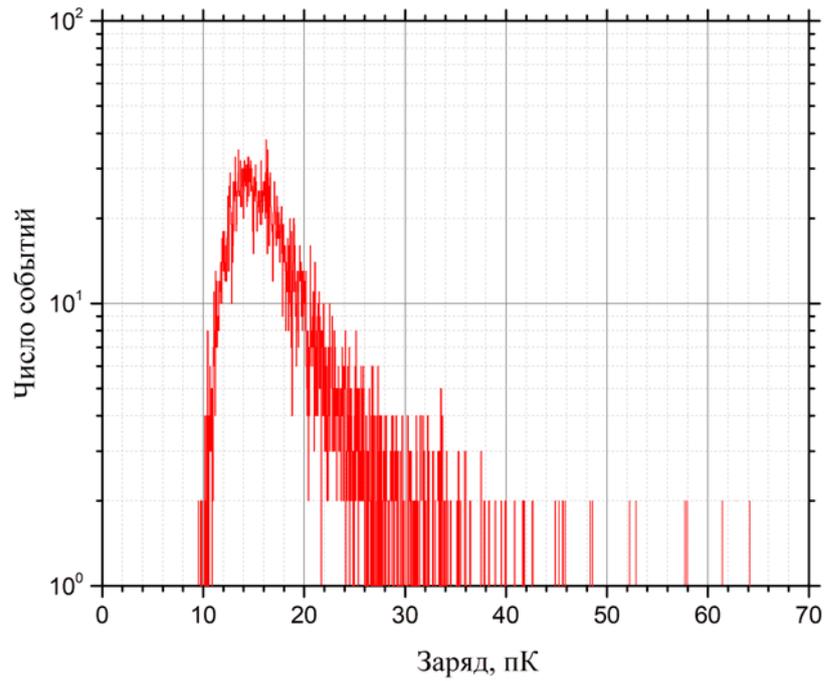


Рисунок 4.14 — Зарядовый спектр отклика сцинтилляционного детектора системы мюонного вето установки IAXO-D0 на прохождение мюона космических лучей.

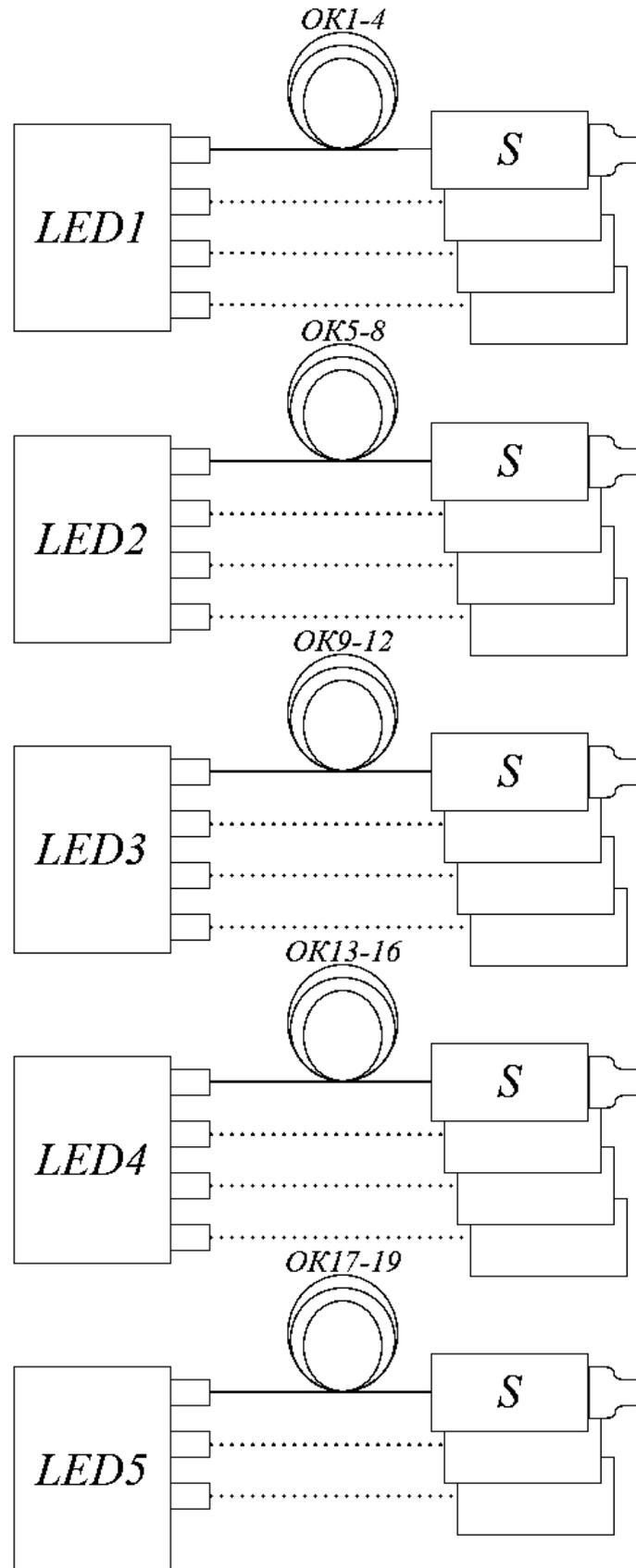


Рисунок 4.15 — Функциональная схема светодиодной калибровочной системы, разработанной для детектора мюонного вето эксперимента BabyIAXO.

Заключение к Главе 4

1. Предложено использование пластиковых сцинтилляторов из эксперимента МАМІ в мюонном детекторе вето эксперимента BabyIAXO.
2. Протестированы, отобраны и переработаны более 120 сцинтилляционных пластин размерами $5 \times 20 \times 300 \text{ см}^3$ каждая.
3. Протестировано 260 фотоумножителей XR2312В. Из них 190 штук отобрано для использования в детекторе мюонного вето эксперимента BabyIAXO.
4. Разработана калибровочная система мюонного вето эксперимента эксперимента BabyIAXO на базе быстродействующих источников света на основе ультраярких синих светодиодов и пластиковых оптоволоконных кабелей.
5. Разработан и создан детектор мюонного вето эксперимента эксперимента BabyIAXO, позволяющий достичь требуемого в эксперименте уровня фона:

Заключение

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 ≤ 1 нс (FWHM); для светодиодов высокой мощности ~ 2.5 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 выходов 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.

Выражаю глубочайшую благодарность и признательность моему научному руководителю д.ф.-м.н. Баярто Константиновичу Лубсандоржиеву за постановку задачи, внимательное отношение, неоценимо полезные советы и помощь на всех этапах работы.

Хочу выразить свою искреннюю благодарность руководителю проекта Баксанского большого нейтринного телескопа Гаврину В.Н., всем участникам проекта и причастным к нему сотрудникам БНО ИЯИ РАН, а также моим товарищам Сидоренкову А.Ю., Ушакову Н.А., Луканову А.Д., Фазлиахметову А.Н. и Нанзанову Д.А.

Искреннюю благодарность хочу выразить сотрудникам астрофизического комплекса TAIGA, а также коллегам по экспериментам JUNO и BabyIAXO.

Список литературы

1. The Baikal underwater neutrino telescope: Design, performance and first results / I. A. Belolaptikov [et al.] // *Astropart. Phys.* — 1997. — Vol. 7. — P. 263—282. — DOI: 10.1016/S0927-6505(97)00022-4.
2. Baikal-GVD – нейтринный телескоп следующего поколения на озере Байкал / А. В. Аврорин [и др.] // *Известия Российской академии наук. Серия физическая.* — 2019. — Т. 83, № 8. — С. 1016—1018. — DOI: 10.1134/S0367676519080052.
3. The ANTARES optical module / P. Amram [et al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* — 2002. — Vol. 484, no. 1. — P. 369—383. — DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(01\)02026-5](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)02026-5). — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900201020265>.
4. Letter of intent for KM3NeT 2.0 / S. Adrián-Martínez [et al.] // *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics.* — 2016. — June. — Vol. 43, no. 8. — P. 084001. — DOI: 10.1088/0954-3899/43/8/084001. — URL: <https://dx.doi.org/10.1088/0954-3899/43/8/084001>.
5. A multi-cubic-kilometre neutrino telescope in the western Pacific Ocean / Z. P. Ye [et al.] // *Nature Astronomy.* — 2023. — Vol. 7. — P. 1497—1505. — DOI: 10.1038/s41550-023-02087-6. — URL: <https://doi.org/10.1038/s41550-023-02087-6>.
6. The Pacific Ocean Neutrino Experiment / M. Agostini [et al.] // *Nature Astronomy.* — 2020. — Vol. 4. — P. 913—915. — DOI: 10.1038/s41550-020-1182-4. — URL: <https://doi.org/10.1038/s41550-020-1182-4>.
7. Neutrinos from SN1987a in the IMB detector / T. Haines [et al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* — 1988. — Vol. 264, no. 1. — P. 28—31. — DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(88\)91097-2](https://doi.org/10.1016/0168-9002(88)91097-2). — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168900288910972>.

8. Observation of a neutrino burst from the supernova SN1987A / K. Hirata [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 1987. — Apr. — Vol. 58, issue 14. — P. 1490—1493. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.58.1490. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.58.1490>.
9. The Super-Kamiokande detector / S. Fukuda [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2003. — Vol. 501, no. 2. — P. 418—462. — DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)00425-X](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)00425-X). — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016890020300425X>.
10. The Sudbury Neutrino Observatory / J. Boger [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2000. — July. — Vol. 449, no. 1/2. — P. 172—207. — DOI: 10.1016/S0168-9002(99)01469-2.
11. First year performance of the IceCube neutrino telescope / A. Achterberg [et al.] // Astroparticle Physics. — 2006. — Vol. 26, no. 3. — P. 155—173. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2006.06.007>. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927650506000855>.
12. The Borexino detector at the Laboratori Nazionali del Gran Sasso / G. Alimonti [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2009. — Vol. 600, no. 3. — P. 568—593. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.11.076>. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016890020801601X>.
13. *Suekane, F.* KamLAND / F. Suekane // Progress in Particle and Nuclear Physics. — 2006. — Vol. 57, no. 1. — P. 106—126. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2005.12.008>. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0146641005001559> ; International Workshop of Nuclear Physics 27th course.
14. The SNO+ experiment / T. S. collaboration [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2021. — Aug. — Vol. 16, no. 08. — P08059. — DOI: 10.1088/1748-0221/16/08/P08059. — URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/16/08/P08059>.

15. JUNO physics and detector / A. Abusleme [et al.] // Prog. Part. Nucl. Phys. — 2022. — Vol. 123. — P. 103927. — DOI: 10.1016/j.pnpnp.2021.103927. — arXiv: 2104.02565 [hep-ex].
16. Measurement of the Flux of Ultrahigh Energy Cosmic Rays from Monocular Observations by the High Resolution Fly’s Eye Experiment / R. U. Abbasi [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2004. — Apr. — Vol. 92, issue 15. — P. 151101. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.92.151101. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.92.151101>.
17. From the Tevatron to the LHC: Physics at large accelerators. Proceedings, 24th International Meeting on Fundamental Physics, Valencia, Spain, April 22-26, 1996 / ed. by A. Ferrer. — Singapore : WSP, 1997.
18. *Matthews, J.* Highlights from the Telescope Array / J. Matthews // ICRC2017. — 2018. — P. 1096. — DOI: 10.22323/1.301.1096.
19. *Unger, M.* Highlights from the Pierre Auger Observatory / M. Unger // ICRC2017. — 2018. — P. 1102. — DOI: 10.22323/1.301.1102.
20. Изучение космических лучей на астрофизическом комплексе TAIGA: результаты и планы / И. Астапов [и др.] // ЖЭТФ. — 2022. — Т. 161. — С. 548—559. — DOI: 10.31857/S0044451022040095.
21. Introduction to Large High Altitude Air Shower Observatory (LHAASO) / C. Zhen [et al.] // Chin. Astron. Astrophys. — 2019. — Vol. 43. — P. 457—478. — DOI: 10.1016/j.chinastron.2019.11.001.
22. *Скачков, Ю.* Характеристики искровых счетчиков с плоско-параллельными электродами / Ю. Скачков // ПТЭ. — 1961. — Т. 6, № 6. — С. 41.
23. *Мейлинг, В.* Наносекундная импульсная техника / В. Мейлинг, Ф. Стари. — М. : Атомиздат, 1973. — 293-296.
24. 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. — DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(89\)91104-2](https://doi.org/10.1016/0168-9002(89)91104-2). — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168900289911042>.

25. *D'Alessio, J. T.* Ultraviolet Lamp for the Generation of Intense, Constant-Shape Pulses in the Subnanosecond Region / J. T. D'Alessio, P. K. Ludwig, M. Burton // Review of Scientific Instruments. — 1964. — Vol. 35. — P. 1015—1017. — URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:119410893>.
26. *D'Alessio, J. T.* Generation and Measurement of UV Pulses in the Sub-Nanosecond Region / J. T. D'Alessio, P. K. Ludwig // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 1965. — Vol. 12, no. 1. — P. 351—355. — DOI: 10.1109/TNS.1965.4323534.
27. *Yguerabide, J.* Generation and Detection of Subnanosecond Light Pulses: Application to Luminescence Studies / J. Yguerabide // Review of Scientific Instruments. — 1965. — Dec. — Vol. 36, no. 12. — P. 1734—1742. — DOI: 10.1063/1.1719453. — eprint: https://pubs.aip.org/aip/rsi/article-pdf/36/12/1734/19251581/1734_1_online.pdf. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.1719453>.
28. The ÍMB Photomultiplier Test Facility for Proton Decay Studies / C. Cory [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 1981. — Vol. 28, no. 1. — P. 445—450. — DOI: 10.1109/TNS.1981.4331215.
29. The IMB photomultiplier test facility* / C. Wuest [et al.] // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A. — 1985. — Sept. — Vol. 239, no. 3. — P. 467—486. — DOI: 10.1016/0168-9002(85)90025-7.
30. *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.
31. Optical calibration hardware for the Sudbury Neutrino Observatory / B. Mof-fat [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2005. — Vol. 554, no. 1. — P. 255—265. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.08.029>. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900205016359>.

32. *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. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.74.425>.
33. *Belolaptikov, I.* Response of the NT-36 Array to a distant point-like light source / I. Belolaptikov //. *ICRC1995.* — 1995. — P. 1043.
34. *Nakamura, S.* High-brightness InGaN/AlGaN double-heterostructure blue-green-light-emitting diodes / S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh // *Journal of Applied Physics.* — 1994. — Dec. — Vol. 76, no. 12. — P. 8189—8191. — DOI: 10.1063/1.357872. — eprint: https://pubs.aip.org/aip/jap/article-pdf/76/12/8189/18672940/8189_1_online.pdf. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.357872>.
35. *Nakamura, S.* Candela-class high-brightness InGaN/AlGaN double-heterostructure blue-light-emitting diodes / S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh // *Applied Physics Letters.* — 1994. — Mar. — Vol. 64, no. 13. — P. 1687—1689. — DOI: 10.1063/1.111832. — eprint: https://pubs.aip.org/aip/apl/article-pdf/64/13/1687/18501886/1687_1_online.pdf. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.111832>.
36. High-Brightness InGaN Blue, Green and Yellow Light-Emitting Diodes with Quantum Well Structures / S. Nakamura [et al.] // *Japanese Journal of Applied Physics.* — 1995. — July. — Vol. 34, 7A. — P. L797. — DOI: 10.1143/JJAP.34.L797. — URL: <https://dx.doi.org/10.1143/JJAP.34.L797>.
37. InGaN-Based Multi-Quantum-Well-Structure Laser Diodes / S. Nakamura [et al.] // *Japanese Journal of Applied Physics.* — 1996. — Jan. — Vol. 35, 1B. — P. L74. — DOI: 10.1143/JJAP.35.L74. — URL: <https://dx.doi.org/10.1143/JJAP.35.L74>.
38. *Nakamura, S.* The blue Laser Diode: GaN based Light Emitters and Lasers / S. Nakamura, G. Fasol. — Heidelberg : Springer, 1997. — 343 p.
39. Review on the Progress of AlGaN-based Ultraviolet Light-Emitting Diodes / Y. Chen [et al.] // *Fundamental Research.* — 2021. — Nov. — Vol. 1. — DOI: 10.1016/j.fmre.2021.11.005.

40. High-efficiency AlGaIn/GaN/AlGaIn tunnel junction ultraviolet light-emitting diodes / A. Pandey [et al.] // Photonics Research. — 2020. — URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:213065227>.
41. A cross-field photomultiplier with sub-nanosecond risetime suitable for nuclear studies / J. A. Lodge [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 1968. — Vol. 15, no. 1. — P. 491—497. — DOI: 10.1109/TNS.1968.4324891.
42. *Вятчин, Е.* Исследование стабильности наносекундных источников света на основе синих светоизлучающих диодов из соединений GaN и InGaIn / Е. Вятчин, Б. Лубсандоржиев // Приборы и Техника Эксперимента. — 2004. — № 4. — С. 80—84.
43. LED based powerful nanosecond light sources for calibration systems of deep underwater neutrino telescopes / B. Lubsandorzhiiev [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A-accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment. — 2009. — Apr. — Vol. 602. — P. 220—223. — DOI: 10.1016/j.nima.2008.12.220.
44. Светодиодная калибровочная система Байкальского нейтринного телескопа НТ-200+ / Р. Васильев [и др.] // Приборы и Техника Эксперимента. — 2011. — № 4. — С. 11—19.
45. *Васильев, Р. В.* Точность временных измерений в экспериментах с вакуумными фотодетекторами в нейтринной астрофизике высоких энергий и физике космических лучей : дис. канд. физ.-мат. наук : 01.04.01 / Р. В. Васильев. — М., 2005. — 189 с.
46. *Вятчин, Е. Э.* Наносекундные источники света для калибровочных измерений в черенковских и сцинтилляционных детекторах : дис. канд. физ.-мат. наук : 01.04.01 / Е. Э. Вятчин. — М., 2006. — 167 с.
47. *Шайбонов, Б. А.* Детекторы фотонов и калибровочные системы экспериментов GERDA и ТУНКА : дис. канд. физ.-мат. наук : 01.04.01 / Б. А. Шайбонов. — М., 2011. — 153 с.
48. *Lo, C. C.* A Measuring System for Studying the Time-Resolution Capabilities of Fast Photomultipliers / C. C. Lo, B. Leskovar // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 1974. — Vol. 21, no. 1. — P. 93—105. — DOI: 10.1109/TNS.1974.4327450.

49. *McFarlane, W. K.* An inexpensive nanosecond light pulser for use in photomultiplier system testing / W. K. McFarlane // Review of Scientific Instruments. — 1974. — Feb. — Vol. 45, no. 2. — P. 286—289. — DOI: 10.1063/1.1686606. — eprint: https://pubs.aip.org/aip/rsi/article-pdf/45/2/286/19222191/286_1_online.pdf. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.1686606>.
50. *Araki, T.* Light emitting diode-based nanosecond ultraviolet light source for fluorescence lifetime measurements / T. Araki, H. Misawa // Review of Scientific Instruments. — 1995. — Dec. — Vol. 66, no. 12. — P. 5469—5472. — DOI: 10.1063/1.1146519. — eprint: https://pubs.aip.org/aip/rsi/article-pdf/66/12/5469/19266310/5469_1_online.pdf. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.1146519>.
51. *Araki, T.* An ultraviolet nanosecond light pulse generator using a light emitting diode for test of photodetectors / T. Araki, Y. Fujisawa, M. Hashimoto // Review of Scientific Instruments. — 1997. — Mar. — Vol. 68, no. 3. — P. 1365—1368. — DOI: 10.1063/1.1147943. — eprint: https://pubs.aip.org/aip/rsi/article-pdf/68/3/1365/19115688/1365_1_online.pdf. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.1147943>.
52. A fast timing light pulser for scintillation detectors / J. S. Kapustinsky [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 1985. — Vol. 241, no. 2/3. — P. 612—613. — DOI: 10.1016/0168-9002(85)90622-9.
53. *Васильев, Р.* Простой, компактный, наносекундный источник света для калибровочных измерений в сцинтилляционных и черенковских детекторах / Р. Васильев, Б. Лубсандоржиев, П. Похил // Препринт ИЯИ РАН-1003/99. — 1999. — С. 8.
54. *Васильев, Р.* Наносекундный источник света для калибровочных измерений в сцинтилляционных и черенковских детекторах. / Р. Васильев, Б. Лубсандоржиев, П. Похил // Приборы и Техника Эксперимента. — 2000. — Янв. — С. 148—151.
55. *Lubsandorzhev, B.* Timing of a nanosecond light pulser / B. Lubsandorzhev, Y. Vyatchin // Preprint INR-1135/2004. — 2004. — P. 8.
56. Imitators of Cherenkov and scintillation light pulses based on fast LEDs / S. Lubsandorzhev [et al.] // ICRC2019. — 2019. — P. 947.

57. Calibration system of EAS Cherenkov arrays using commercial drone helicopter. / D. Voronin [et al.] // ICRC2019. — 07/2021. — P. 268. — DOI: 10.22323/1.395.0268.
58. *Hess, V.* On the absorption of gamma-radiation in the atmosphere / V. Hess // Phys. Zeit. — 1911. — № 12. — С. 998—1001.
59. *Hess, V.* Observations in low level radiation during seven balloon flights / V. Hess // Phys. Zeit. — 1912. — № 13. — С. 1084—1091.
60. *Hess, V.* The origins of penetrating radiation / V. Hess // Phys. Zeit. — 1913. — № 14. — С. 612.
61. Review of Particle Physics / R. L. Workman [et al.] // PTEP. — 2022. — Vol. 2022. — P. 083C01. — DOI: 10.1093/ptep/ptac097.
62. *Куликов, Г.* О спектре широких атмосферных ливней по числу частиц / Г. Куликов, Г. Христиансен // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 1958. — Т. 35. — С. 635.
63. *Зацепин, Г.* О верхней границе спектра космических лучей / Г. Зацепин, В. Кузьмин // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 1966. — Т. 4. — С. 114.
64. *Greisen, K.* End to the Cosmic-Ray Spectrum? / K. Greisen // Phys. Rev. Lett. — 1966. — Apr. — Vol. 16, issue 17. — P. 748—750. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.16.748. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.16.748>.
65. The Cosmic ray energy spectrum observed by the Fly's Eye / D. J. Bird [et al.] // The Astrophysical Journal. — 1994. — Vol. 424. — P. 491—502. — URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:119769609>.
66. Evidence for correlated changes in the spectrum and composition of cosmic rays at extremely high energies. / D. J. Bird [et al.] // Physical review letters. — 1993. — Vol. 71 21. — P. 3401—3404. — URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:19785833>.
67. An extremely energetic cosmic ray observed by a surface detector array / R. U. Abbasi [et al.] // Science. — 2023. — Vol. 382, no. 6673. — P. abo5095. — DOI: 10.1126/science.abo5095. — arXiv: 2311.14231 [astro-ph.HE].

68. Поиски фотонов высокой энергии от локальных источников космического радиоизлучения / В. Зацепин [и др.] // Труды ФИАН им. Лебедева. — 1964. — Т. 26. — С. 118—141.
69. *Lorenz, E.* Gamma-ray astronomy with ground-based array detectors: Status and perspectives / E. Lorenz // Journal of Physics: Conference Series, 60, 1-7 (2007). — 2007. — Mar. — Vol. 60. — DOI: 10.1088/1742-6596/60/1/001.
70. *Sciascio, G.* Ground-based Gamma-Ray Astronomy: Introduction / G. Sciascio // Journal of Physics: Conference Series. — 2019. — Vol. 1263.
71. *Mirzoyan, R.* The Development of Ground-Based Gamma-Ray Astronomy: A Historical Overview of the Pioneering Experiments / R. Mirzoyan // Handbook of X-ray and Gamma-ray Astrophysics / ed. by C. Bambi, A. Santangelo. — Singapore : Springer Nature Singapore, 2024. — P. 2521—2546. — DOI: 10.1007/978-981-19-6960-7_62. — URL: https://doi.org/10.1007/978-981-19-6960-7_62.
72. Observation of Very High Energy Gamma-Ray Emission from the Active Galactic Nucleus 1ES 1959+650 Using the MAGIC Telescope / J. Albert [et al.] // The Astrophysical Journal. — 2006. — Mar. — Vol. 639, no. 2. — P. 761—765. — DOI: 10.1086/499421. — URL: <http://dx.doi.org/10.1086/499421>.
73. High-energy particle acceleration in the shell of a supernova remnant / F. Aharonian [et al.] // Nature. — 2004. — Dec. — Vol. 432. — P. 75—7. — DOI: 10.1038/nature02960.
74. Discovery of TeV Gamma Ray Emission from Tycho's Supernova Remnant / V. Acciari [et al.] // Astrophysical Journal - ASTROPHYS J. — 2011. — Feb. — Vol. 730. — DOI: 10.1088/2041-8205/730/2/L20.
75. The Tunka - Multi-component EAS detector for high energy cosmic ray studies / S. Berezhnev [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment. — 2013. — June. — Vol. 732. — P. 281—285. — DOI: 10.1016/j.nima.2013.05.180.

76. TAIGA the Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma Astronomy - present status and perspectives. / N. M. Budnev [et al.] // JINST. — 2014. — Vol. 9. — P. C09021. — DOI: 10.1088/1748-0221/9/09/C09021.
77. *Lubsandorzhiev, B.* The Tunka experiment: From small “toy” experiments to multi-TeV gamma-ray observatory / B. Lubsandorzhiev // Physics of Particles and Nuclei. — 2015. — Mar. — Vol. 46. — P. 190—196. — DOI: 10.1134/S1063779615020136.
78. The TAIGA experiment: From cosmic-ray to gamma-ray astronomy in the Tunka valley / N. Budnev [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A / ed. by G. Badurek [et al.]. — 2017. — Vol. 845. — P. 330—333. — DOI: 10.1016/j.nima.2016.06.041.
79. TAIGA—A hybrid array for high-energy gamma astronomy and cosmic-ray physics / N. Budnev [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2020. — Vol. 958. — P. 162113. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.04.067>. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900219305418> ; Proceedings of the Vienna Conference on Instrumentation 2019.
80. TAIGA – гибридный комплекс для многоканальной астрономии высоких энергий / Н. БУДНЕВ [и др.] // Журнал технической физики. — 2023. — Т. 93. — С. 1794.
81. The new Tunka-133 EAS Cherenkov array: Status of 2009 / B. V. Antokhonov [et al.] // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A-accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment. — 2011. — Vol. 628. — P. 124—127. — URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:121451535>.
82. The TAIGA timing array HiSCORE - first results / M. Tluczykont [et al.] // EPJ Web of Conferences. — 2017. — Jan. — Vol. 136. — P. 03008. — DOI: 10.1051/epjconf/201713603008.
83. The Tunka-Grande experiment / R. Monkhoev [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2017. — June. — Vol. 12. — P. C06019—C06019. — DOI: 10.1088/1748-0221/12/06/C06019.

84. Design features and data acquisition system of the TAIGA-Muon scintillation array / A. Ivanova [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2020. — June. — Vol. 15. — P. C06057—C06057. — DOI: 10.1088/1748-0221/15/06/C06057.
85. Энергетический спектр гамма-квантов от крабовидной туманности по данным астрофизического комплекса TAIGA / Л. Свешникова [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2023. — Т. 87, № 7. — С. 966—972.
86. Radio measurements of the energy and the depth of the shower maximum of cosmic-ray air showers by Tunka-Rex / P. Bezyazeev [et al.] // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. — 2016. — Jan. — Vol. 2016, no. 01. — P. 052—052. — DOI: 10.1088/1475-7516/2016/01/052. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1475-7516/2016/01/052>.
87. Calibration system of the TUNKA-133 EAS cherenkov array / B. Lubsandorzhev [et al.] // Proceedings of the 32nd International Cosmic Ray Conference, ICRC 2011. — 2011. — Jan. — Vol. 3. — DOI: 10.7529/ICRC2011/V03/1048.
88. A new 1km² EAS Cherenkov array in the Tunka Valley / B. Antokhonov [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2011. — May. — Vol. 639. — P. 42—45. — DOI: 10.1016/j.nima.2010.09.142.
89. A LED Flasher for TUNKA experiment / B. Lubsandorzhev [et al.] // ICRC07. — 2008. — P. 1117—1120.
90. The hybrid installation TAIGA: design, status and preliminary results / N. Lubsandorzhev [et al.] // . — 09/2019. — P. 729. — DOI: 10.22323/1.358.0729.
91. Timing calibration and directional reconstruction for Tunka-HiSCORE / A. Porelli [et al.] // Journal of Physics Conference Series. — 2015. — Aug. — Vol. 632. — P. 012041. — DOI: 10.1088/1742-6596/632/1/012041.
92. *Porelli, A.* TAIGA-HiSCORE: a new wide-angle air Cherenkov detector for multi-TeV gamma-astronomy and cosmic ray physics : PhD thesis / Porelli Andrea. — Humboldt University, 2019. — P. 222.

93. *Поддубный, И. А.* Разработка методики амплитудной и временной калибровок черенковских установок экспериментального комплекса TAIGA : ВКР бакалавра : 03.03.02 / И. А. Поддубный. — Иркутск, 2022. — 36 с.
94. *Gress, O.* TAIGA-IACT telescopes for the Multi-Messenger observations / O. Gress, R. Togo, D. Zhurov // ICRC2023. — 2023. — P. 939. — DOI: 10.22323/1.444.0939.
95. Camera of the first TAIGA-IACT: construction and calibration / N. Lubsanzorzhiev [et al.] // ICRC2017. — 2017. — P. 757. — DOI: 10.22323/1.301.0757.
96. *Andresen, A.* Construction and beam test of the Zeus forward+rear calorimeter / A. Andresen, H. Fawcett // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1991. — Vol. A309. — P. 101—142. — Other: № 74 other authors.
97. Automatic test of photomultiplier tubes for the ZEUS forward and rear calorimeters / T. Ishii [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1992. — Sept. — Vol. 320. — P. 449—459. — DOI: 10.1016/0168-9002(92)90941-V.
98. *Ушаков, Н. А.* Разработка и создание полутонного прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа : дис. канд. физ.-мат. наук : 01.04.01 / Н. А. Ушаков. — М., 2022. — 123 с.
99. *Сидоренков, А. Ю.* Разработка жидкого сцинтиллятора на основе линейного алкилбензола для экспериментов следующего поколения в астрофизике частиц : дис. канд. физ.-мат. наук : 01.04.01 / А. Ю. Сидоренков. — М., 2021. — 137 с.
100. Indication of Reactor $\bar{\nu}_e$ Disappearance in the Double Chooz Experiment / Y. Abe [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2012. — Mar. — Vol. 108, issue 13. — P. 131801. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.131801. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.108.131801>.
101. Observation of Electron-Antineutrino Disappearance at Daya Bay / F. P. An [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2012. — Apr. — Vol. 108, issue 17. —

- P. 171803. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.171803. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.108.171803>.
102. Observation of Reactor Electron Antineutrinos Disappearance in the RENO Experiment / J. K. Ahn [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2012. — May. — Vol. 108, issue 19. — P. 191802. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.191802. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.108.191802>.
103. Review of Particle Physics / S. Navas [et al.] // Phys. Rev. D. — 2024. — Aug. — Vol. 110, issue 3. — P. 030001. — DOI: 10.1103/PhysRevD.110.030001. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.110.030001>.
104. JUNO Conceptual Design Report / T. Adam [et al.]. — 2015. — arXiv: 1508.07166 [physics.ins-det].
105. JUNO physics and detector // Progress in Particle and Nuclear Physics. — 2022. — Mar. — Vol. 123. — P. 103927. — DOI: 10.1016/j.ppnp.2021.103927. — URL: <https://doi.org/10.1016%2Fj.ppnp.2021.103927>.
106. *Ranucci, G.* Status and prospects of the JUNO experiment / G. Ranucci // Journal of Physics: Conference Series. — 2017. — Sept. — Vol. 888. — P. 012022. — DOI: 10.1088/1742-6596/888/1/012022.
107. Neutrino physics with JUNO / F. An [et al.] // Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics. — 2016. — Feb. — Vol. 43, no. 3. — P. 030401. — DOI: 10.1088/0954-3899/43/3/030401. — URL: <https://dx.doi.org/10.1088/0954-3899/43/3/030401>.
108. Optimization of the JUNO liquid scintillator composition using a Daya Bay antineutrino detector / A. Abusleme [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2021. — Vol. 988. — P. 164823. — DOI: 10.1016/j.nima.2020.164823. — arXiv: 2007.00314 [physics.ins-det].
109. A complete optical model for liquid-scintillator detectors / Y. Zhang [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2020. — Vol. 967. — P. 163860. — DOI: 10.1016/j.nima.2020.163860. — arXiv: 2003.12212 [physics.ins-det].
110. The JUNO experiment Top Tracker / A. Abusleme [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2023. — Vol. 1057. — P. 168680. — DOI: 10.1016/j.nima.2023.168680. — arXiv: 2303.05172 [hep-ex].

111. The OPERA experiment Target Tracker / T. Adam [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2007. — Vol. 577, no. 3. — P. 523—539. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.04.147>. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900207007553>.
112. Study of the front-end signal for the 3-inch PMTs instrumentation in JUNO / D. Wu [et al.] // Rad. Det. Tech. Meth. — 2022. — Vol. 6, no. 3. — P. 349—360. — DOI: 10.1007/s41605-022-00324-6. — arXiv: 2204.02612 [physics.ins-det].
113. 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. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165347>. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900221003314>.
114. *Jollet, C.* The 3-inch Photomultiplier System of the JUNO Experiment / C. Jollet // ICHEP2020. — 2021. — P. 203. — DOI: 10.22323/1.390.0203.
115. *Lubsandorzhev, B. K.* Studies of “Kapustinsky’s” light pulser timing characteristics / B. K. Lubsandorzhev, Y. E. Vyatchin // Journal of Instrumentation. — 2006. — Vol. 1, no. 06. — T06001. — DOI: 10.1088/1748-0221/1/06/T06001.
116. Study on the time resolution limits of FPMT and SiPM under femtosecond laser / L. Ma [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2023. — July. — Vol. 1055. — P. 168518. — DOI: 10.1016/j.nima.2023.168518.
117. *Анисимова, И.* Фотоэлектронные умножители / И. Анисимова, Б. Глуховской. — Москва : Советское радио, 1974. — 64 с.
118. *Берковский, А.* Вакуумные фотоэлектронные приборы / А. Берковский, В. Гаванин, И. Зайдель. — Москва : Радио и связь, 1988. — 272 с.
119. *Flyckt, S.-O.* Photomultiplier Tubes. Principles and applications / S.-O. Flyckt, C. Marmonier. — France : Photonis, 2002. — 311 p.

120. *Wright, A.* The Photomultiplier Handbook / A. Wright. — United Kingdom : Oxford University Press, 2017. — 640 p.
121. *Poleshchuk, R.* An observation of a new class of afterpulses with delay time in the range of 70–200us in classical vacuum photomultipliers / R. Poleshchuk, B. Lubsandorzhev, R. Vasilyev // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2012. — Feb. — Vol. 695. — DOI: 10.1016/j.nima.2011.11.030.
122. Baksan large volume scintillation telescope: a current status / V. Petkov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2020. — Feb. — Vol. 1468. — P. 012244. — DOI: 10.1088/1742-6596/1468/1/012244.
123. Modeling of a MeV-scale particle detector based on organic liquid scintillator / Y. Malyshkin [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2019. — Oct. — Vol. 951. — P. 162920. — DOI: 10.1016/j.nima.2019.162920.
124. New large-volume detector at the Baksan Neutrino Observatory: Detector prototype / N. Ushakov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 1787. — URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:234056362>.
125. A new Baksan Large Neutrino Telescope: the project's status / N. Ushakov [et al.] //. — 07/2021. — P. 1188. — DOI: 10.22323/1.395.1188.
126. Баксанский большой нейтринный телескоп: текущий статус / А. Д. Луканов [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2023. — Т. 87, № 7. — С. 995–1001. — URL: <https://journals.rcsi.science/0367-6765/article/view/135435>.
127. Baksan Large Neutrino Telescope Project: Prototypes and Perspectives / A. Lukanov [et al.] // Physics of Atomic Nuclei. — 2024. — Feb. — Vol. 86. — P. 1380–1384. — DOI: 10.1134/S1063778823060182.
128. Working characteristics of the New Low-Background Laboratory (DULB-4900) / J. Gavriljuk [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2013. — Vol. 729. — P. 576–580. —

- DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2013.07.090>. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900213011315>.
129. Интенсивность мюонов космических лучей в лаборатории глубокого заложения ГГНТ / В. Гаврин [и др.] // Препринт / ИЛИ АН СССР П-698. — 1991. — С. 3—16.
 130. ATmega328P Datasheet / Atmel Corporation. — Rev.: 7810D-AVR-01/15. — 1600 Technology Drive, San Jose, CA 95110 USA, 2015.
 131. STM32F401xB STM32F401xC Datasheet - production data / STMicroelectronics. — DS9716 Rev 11. — Plan-les-Ouates, Geneva, Switzerland, 2019.
 132. MT3608 / Xi'an Aerosemi Technology Co., Ltd. — V1.00th ed. — Shaanxi, XI'an high-tech zone jinye Road 70, China.
 133. CP2102/9 Data Sheet: Single-chip USB-to-UART Bridge / Silicon Laboratories Inc. — Rev 1.8. — 400 West Cesar Chavez, Austin, TX 78701, USA, 2017.
 134. Optical calibration of the SNO+ detector in the water phase with deployed sources / S. collaboration [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2021. — Oct. — Vol. 16, no. 10. — P10021. — DOI: 10.1088/1748-0221/16/10/P10021. — URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/16/10/P10021>.
 135. International Atomic Energy Agency - Nuclear Data Section [Электронный ресурс]. — URL: <https://www-nds.iaea.org/> (дата обр. 29.05.2023).
 136. *Birks, J.* The Theory and Practice of Scintillation Counting: International Series of Monographs in Electronics and Instrumentation / J. Birks. — Great Britain : Pergamon Press, 1964. — 684 p.
 137. *Torrise, L.* Plastic scintillator investigations for relative dosimetry in proton-therapy / L. Torrise // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B-beam Interactions With Materials and Atoms. — 2000. — Vol. 170. — P. 523—530. — URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:95478879>.
 138. Proton Beam Dosimetry: a Comparison between a Plastic Scintillator, Ionization Chamber and Faraday Cup / M. Ghergherehchi [et al.] // Journal of Radiation Research. — 2010. — Vol. 51, no. 4. — P. 423—430. — DOI: 10.1269/jrr.09121.

139. Light yield quenching and quenching remediation in liquid scintillator detectors / S. Hans [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2020. — Dec. — Vol. 15. — P12020—P12020. — DOI: 10.1088/1748-0221/15/12/P12020.
140. Measurement of α -particle quenching in LAB based scintillator in independent small-scale experiments / B. von Krosigk [et al.] // The European Physical Journal C. — 2015. — Oct. — Vol. 76. — DOI: 10.1140/epjc/s10052-016-3959-2.
141. *Chadha-Day, F.* Axion dark matter: What is it and why now? / F. Chadha-Day, J. Ellis, D. Marsh // Science advances. — 2022. — Feb. — Vol. 8. — eabj3618. — DOI: 10.1126/sciadv.abj3618.
142. *Semertzidis, Y.* Axion dark matter: How to see it? / Y. Semertzidis, S. Youn // Science advances. — 2022. — Feb. — Vol. 8. — eabm9928. — DOI: 10.1126/sciadv.abm9928.
143. *Peccei, R.* CP Conservation in the Presence of Pseudoparticles / R. Peccei, H. Quinn // Physical Review Letters - PHYS REV LETT. — 1977. — June. — Vol. 38. — P. 1440—1443. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.38.1440.
144. *Weinberg, S.* A New Light Boson? / S. Weinberg // Phys. Rev. Lett. — 1978. — Jan. — Vol. 40, issue 4. — P. 223—226. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.40.223. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.40.223>.
145. *Wilczek, F.* Problem of Strong P and T Invariance in the Presence of Instantons / F. Wilczek // Phys. Rev. Lett. — 1978. — Jan. — Vol. 40, issue 5. — P. 279—282. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.40.279. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.40.279>.
146. *Shifman, M. A.* Can Confinement Ensure Natural CP Invariance of Strong Interactions? / M. A. Shifman, A. I. Vainshtein, V. I. Zakharov // Nucl. Phys. B. — 1980. — Vol. 166. — P. 493—506. — DOI: 10.1016/0550-3213(80)90209-6.
147. *Dine, M.* A Simple Solution to the Strong CP Problem with a Harmless Axion / M. Dine, W. Fischler, M. Srednicki // Phys. Lett. B. — 1981. — Vol. 104. — P. 199—202. — DOI: 10.1016/0370-2693(81)90590-6.

148. *Zhitnitsky, A. R.* On Possible Suppression of the Axion Hadron Interactions. (In Russian) / A. R. Zhitnitsky // *Sov. J. Nucl. Phys.* — 1980. — Vol. 31. — P. 260.
149. New CAST Limit on the Axion-Photon Interaction / V. Anastassopoulos [et al.] // *Nature Phys.* — 2017. — Vol. 13. — P. 584—590. — DOI: 10.1038/nphys4109. — arXiv: 1705.02290 [hep-ex].
150. Physics potential of the International Axion Observatory (IAXO) / E. Armengaud [et al.] // *JCAP.* — 2019. — Vol. 06. — P. 047. — DOI: 10.1088/1475-7516/2019/06/047. — arXiv: 1904.09155 [hep-ph].
151. Conceptual design of BabyIAXO, the intermediate stage towards the International Axion Observatory / A. Abeln [et al.] // *JHEP.* — 2021. — Vol. 05. — P. 137. — DOI: 10.1007/JHEP05(2021)137. — arXiv: 2010.12076 [physics.ins-det].
152. 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.
153. Multi-pixel Geiger-mode avalanche photodiode and wavelength shifting fibre readout of plastic scintillator counters of the EMMA underground experiment / E. Akhrameev [et al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* — 2009. — Jan. — Vol. 610. — P. 419—422. — DOI: 10.1016/j.nima.2009.05.171.