



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ
имени В.П. Джелепова

141980, Дубна, Московская область, РОССИЯ

Телефон: (49621) 62 121, (49621) 65 059

Факс: (49621) 66 666, (495) 975 23 81

Телекс: 911621 DubnaRU

E-mail: director@nu.jinr.ru

ОТЗЫВ

официального оппонента Якушева Евгения Александровича на диссертационную работу Шейфлера Алексея Александровича «Оптический модуль Байкальского глубоководного нейтринного телескопа ВАИКАЛ-GVD (разработка и испытания регистрирующей системы)», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Диссертация Шейфлера А.А. посвящена важной проблеме – разработке оптического модуля, оптимизированного для работы в составе Байкальского нейтринного телескопа Baikal-GVD и разработке автоматизированной системы для калибровки и проверки оптических модулей в условиях их массового производства.

Актуальность темы диссертации для науки и практики.

Глубоководный нейтринный телескоп кубокилометрового масштаба Baikal-GVD является новой исследовательской инфраструктурой, создаваемой в России, имеющей основную цель в изучении потока нейтрино от астрофизических объектов. Baikal-GVD будет использовать воду озера Байкал как рабочую среду, где оптические сенсоры будут регистрировать черенковское излучение, которое генерируют вторичные частицы, образованные во взаимодействиях нейтрино высоких энергий внутри или вблизи

инструментального объема детектора. Астрофизических событий с энергиями >100 ТэВ, обнаруженные детектором «IceCube», привели к настоящему всплеску интереса к этим исследованиям. Предполагается, что установка Baikal-GVD будет обладать совокупностью целого ряда уникальных параметров, недоступных другим детекторам. При величине эффективного объема детектора сравнимой с IceCube, Baikal-GVD будет иметь лучшее угловое и энергетическое разрешение. Его область исследования включает центр нашей Галактики (в отличие от IceCube). Все это позволит получить данные, имеющие высочайшую значимость для современной физики и астрофизики. Без сомнения, научный мир с нетерпением ожидает первых результатов Baikal-GVD. Разработанный в рамках диссертационной работы оптический модуль является основным регистрирующим элементом глубоководного нейтринного телескопа, а характеристики фотоприемников оптических модулей и функциональность их электронных узлов в значительной степени определяют параметры нейтринного телескопа.

В диссертации Шейфлера А.А. описывается комплексный подход к решению задачи создания оптического модуля, оптимизированного для работы именно в составе Байкальского нейтринного телескопа Baikal-GVD, с учетом параметров, необходимых для достижения поставленных научных задач. Реализация большого проекта привела к необходимости разработки автоматизированной системы для калибровки и проверки оптических модулей в условиях их массового производства. Именно выполнение этой работы, описанной в диссертации Шейфлера А.А., сделало реальностью реализацию проекта Baikal-GVD.

Диссертация состоит из Введения, шести глав основного текста и Заключения.

Во Введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы и кратко изложено ее содержание по главам. Кроме того приводится

описание этапов работы по разработке и созданию оптического модуля Baikal-GVD. Во введении изложены положения, выносимые автором на защиту, явно указан личный вклад соискателя в полученные результаты. Приведены аргументы, почему выполненная работа является существенно важной для создания Baikal-GVD.

В первой главе дается обзор различных типов оптических модулей, разработанных для нейтринных телескопов в других похожих экспериментах, на основании чего делаются выводы о необходимости учета при создании детектора Baikal-GVD условий эксплуатации оптических модулей, а именно: характеристик излучения Вавилова-Черенкова в озере Байкал, величины светового фона, инфраструктуры телескопа и способов его развёртывания, организации системы сбора данных. В первой главе делается анализа характеристик существующих оптических модулей по типу и конфигурации фотодетекторов, методам обработки и передачи сигналов, подходам к минимизации электропотребления; конструкции глубоководного корпуса. Все это является основой для создания оптического модуля, отвечающего всем требованиям Baikal-GVD.

Вторая глава посвящена обоснованию требований к техническим и конструктивным параметрам оптического модуля Baikal-GVD.

В третьей главе рассматриваются вопросы непосредственно описывающие конструкцию оптического модуля и принцип его работы, а также характеристики основных компонентов оптического модуля Baikal-GVD.

В четвёртой главе, посвященной методическим вопросам, диссертант приводит описание автоматизированного стенда для исследований оптических модулей и их паспортизации. Подробно представлены используемые методики измерений параметров оптических модулей и статистический анализ

полученных результатов. Автором представлены полученные им результаты измерений основных характеристик оптических модулей.

В пятой главе описан процесс подготовки оптических модулей в условиях их массового производства, обеспечивающий требуемый уровень их надежности. Приводятся результаты испытаний созданных оптических модулей.

В шестой главе приводятся результаты, полученные при использовании созданных оптических модулей в условиях реального эксперимента – в первом полномасштабном кластере Baikal-GVD, введенном в эксплуатацию в 2015 году. Показано, что исследования, описание которых дается в первых пяти главах диссертации, начиная от общей формулировки задачи, технического задания, создания оптического модуля с необходимыми характеристиками, создания линии по их производству и тестированию, увенчалось успехом – созданные оптические модули оказались эффективным инструментом регистрации мюонов и каскадных ливней. В условиях реального эксперимента продемонстрирована надежность работы созданной калибровочной системы оптических модулей.

В Заключение диссертации сформулированы все основные результаты диссертации.

Диссертация А.А. Шейфлера выполнена на хорошем современном экспериментальном уровне. Полученные результаты в диссертационной работе в полной мере характеризуют высокую степень её **научной новизны**. Автор продемонстрировал свободное владение современными экспериментальными методиками и методами анализа экспериментальных результатов.

Тем ни менее диссертация не лишена недостатков.

Так на странице 25 диссертации указывается, что в эксперименте AMANDA использовались ФЭУ HAMAMATSU R7081-02. Однако,

приведенные характеристики не соответствуют характеристикам этого ФЭУ, которые правильно приводятся позже на странице 26. В эксперименте AMANDA-а использовались 8" ФЭУ EMI, а на последнем этапе, AMANDA-b4, ФЭУ HAMAMATSU R5912-2, как позже правильно указано в таблице 1-2 и характеристики которых и приведены на странице 25.

В диссертации имеются ссылки на другие диссертационные работы, например ссылки 22, 62, 63. В существующей у нас системе, диссертационные работы содержат только опубликованные результаты. Кажется, более правильным ссылаться именно на эти опубликованные работы.

В ходе рецензирования диссертации возникло несколько вопросов, ответы на которые хотелось бы получить в ходе защиты.

1) На странице 74 диссертации указывается, что вариации свечения байкальской воды могут приводить к увеличению скорости счета отдельных каналов в 5-10 раз. Имеются ли экспериментальные данные с уже эксплуатирующейся установки в озере Байкал какое влияние этот эффект оказывает на энергетический порог регистрации?

2) Имеются ли данные о том как параметры ОМ, полученные в главе 4, соответствуют реальным параметрам во время проведения эксперимента. Температурные режимы во время испытания и в условиях озера Байкал значительно отличаются, необходима ли подстройка параметров ОМ под реальные условия?

3) Проводились ли измерения одного и того же модуля через некоторый интервал времени, скажем год? Имеется ли повторяемость результатов испытаний?

4) Какие другие итерационные алгоритмы, кроме метода золотого сечения, описанного на странице 92 диссертации, могли использоваться для подбора кода светодиода? В чем преимущество именно метода золотого сечения?

5) На странице 100 диссертации указывается, что приведенные данные получены для партии ФЭУ из 87 штук. Далее в диссертации приводятся данные

о том, что в 2016 году в установке используются 288 ОМ, и все они прошли проверки, описанные в диссертационной работе. Что представляют собой эти 87 ФЭУ, почему было решено привести данные именно для них?

6) Амплитудная калибровка каналов нейтринного телескопа проводится на основании измерения одноэлектронных спектров ФЭУ. Параметром, который в значительной степени определяет точность амплитудной калибровки, является отношение пик-долина одноэлектронных распределений. Измеренное среднее значение этого параметра для оптических модулей составило величину около 2 (рис. 4-19), в то время как по данным производителя ФЭУ эта величина составляет значение близкое к 3 (рис. 3-11). К сожалению, в диссертационной работе не обсуждается причина этого расхождения.

7) На странице 23 диссертации сказано, что осаждение осадков на оптический модуль с направленными вверх фотокатодами со временем существенно снижает эффективность их использования. В то время как на странице 79 сказано, что светодиоды в оптическом модуле направлены вверх, что обеспечивает примерно равную засветку фотоэлектронных умножителей, расположенных в оптическом модуле, формирующем светодиодные вспышки, и в оптическом модуле, закрепленном выше по тросу на гирлянде. Измерение разницы времен регистрации светодиодных сигналов на парах соседних модулей позволяет осуществлять относительную временную калибровку каналов. Как сказываются осадки на эффективность регистрации вспышки света верхним оптическим модулем?

Наряду с вышеприведенными научными вопросами имеется несколько замечаний по оформлению диссертации, так страницы 42, 58 и 89 имеют всего несколько строк, при этом не являются окончанием раздела диссертации. На странице 33 диссертации несогласованно предложение "Развернутый детектор непрерывно эксплуатироваться в течение более одного месяца." На странице 64 несогласованно предложение: "... из отожденного пермаллоя, уменьшающей влияние магнитного поля Земли". На странице 65 пропущена запятая в

предложении: "На текущий момент, за единственным (НТ-200, где применялся оптический предусилитель и ФЭУ), в нейтринных телескопах в качестве фотодетекторов используются фотоэлектронные умножители (ФЭУ)." На странице 65 сделана опечатка в слове "квантовой" (написано квартовой). В таблице 3.8 пропущен пробел между словами 2-х и компонентный, в этой же таблице используется термин "квантовая чувствительность", вместо используемого ранее и являющегося общепринятым "квантовая эффективность". На странице 83 написано, что созданные модули "отличаются простотой сборки ...". Это жаргонизм, в действительности не понятно от чего они отличаются. Правильнее было бы написать, например: достоинством созданных модулей является простота сборки ... Во многих местах диссертации ошибки величин приводятся с избыточной точностью, например на странице 97 приводится значение $1,67 \pm 0,028$, для него достаточно было указать ошибку 0,03, тоже касается значения $2,2 \pm 0,26$ на странице 98, $3,6 \pm 0,31$ на странице 103 и всех значений в таблицах 4-3 и 4-4. Некоторые таблицы, например таблица 4.1 – характеристики осциллографа LeCroy HDO 4034, не являются результатами исследований диссертационной работы. Их включение неоправданно увеличивает общий объем диссертации, при этом не представляя никакого интереса для читателя.

Перечисленные замечания не снижают научной и практической ценности представленной диссертационной работы.

Результаты, полученные в диссертации, являются новыми, дополняющими полученные ранее достижения в этой области, своевременно опубликованы в ведущих научных журналах, доложены на международных конференциях и известны специалистам.

Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертации.

В целом диссертация А.А. Шейфлера является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне. В работе решена актуальная задача, имеющая существенное значение для создания современной физической установки нового поколения Baikal-GVD на территории России.

Диссертация Шейфлера Алексея Александровича соответствует всем критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, а её автор за создание системы регистрации черенковского излучения мюонов и каскадных ливней оптического модуля Байкальского глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD, и за методы и алгоритмы получения и контроля характеристик созданных оптических модулей, несомненно заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

23 ноября 2016 года

Официальный оппонент

кандидат физико-математических наук,

начальник сектора Лаборатории ядерных проблем

ОИЯИ

Е.А. Якушев

почтовый адрес: 141980, г. Дубна Московской области, ул. Жолио-Кюри, д. 6

тел.: +7 49 62 16 26 13

e-mail: yakushev@jinr.ru

Подпись Е.А. Якушева удостоверяю,

Ученый секретарь Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ

И.В. Титкова

Якушев Евгений Александрович

кандидат физ.-мат. наук

01.04.16- физика атомного ядра и элементарных частиц.

Основные публикации по теме защиты:

- 1) E Armengaud, ... E. Yakushev et al. Constraints on low-mass WIMPs from the EDELWEISS-III dark matter search, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, (2016), 05, 019;
- 2) V Belov, ... E. Yakushev et al, The ν GeN experiment at the Kalinin Nuclear Power Plant, *Journal of Instrumentation*, (2015), 10, 12, P12011;
- 3) E Armengaud, ... E. Yakushev et al. Development and underground test of radiopure ZnMoO₄ scintillating bolometers for the LUMINEU $0\nu 2\beta$ project, *Journal of Instrumentation*, (2015), 10 05, P05007;
- 4) YB Gurov, SV Rozov, VG Sandukovsky, EA Yakushev, L Hrubcin, B Zat'ko Characteristics of silicon carbide detectors, *Instruments and Experimental Techniques*, (2015) 58 (1), 22-24;
- 5) N Abgrall, ... E. Yakushev et al, The majorana parts tracking database, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* (2015), 779, 52-62;
- 6) N Abgrall, ... E. Yakushev et al, The MAJoRAnA low-noise low-background front-end electronics, *Physics Procedia*, (2015), 61, 654-657;
- 7) I Alekseev, ... E. Yakushev et al, DANSSino: a pilot version of the DANSS neutrino detector, *Physics of Particles and Nuclei Letters*, (2014), 11, 4, 473-482;
- 8) G Angloher, ... E. Yakushev et al, EURECA conceptual design report, *Physics of the Dark Universe*, (2014), 3, 41-74;
- 9) E Armengaud, ... E. Yakushev et al., Axion searches with the EDELWEISS-II experiment, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, (2013), 11, 067;
- 10) E Armengaud, ... E. Yakushev et al, Background studies for the EDELWEISS dark matter experiment, *Astroparticle Physics*, (2013), 47, 1-9;

- 11) B Schmidt, ... E. Yakushev et al, Muon-induced background in the EDELWEISS dark matter search, *Astroparticle Physics*, (2013), 44, 28-39;
- 12) NI Rukhadze, VB Brudanin, P Čermák, J Čermák, JM Jose, V Král, F Mamedov, SV Rozov, EN Rukhadze, AV Salamatin, Yu A Shitov, I Štekl, EA Yakushev, Using pixel detectors in investigations of EC/EC decay, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, (2013), 77, 4, 375-378;
- 13) E Armengaud, ... E. Yakushev et al, Search for low-mass WIMPs with EDELWEISS-II heat-and-ionization detectors, *Physical Review D*, (2012), 86, 5, 051701;
- 14) S Semikh, S Serre, JL Autran, D Munteanu, S Sauze, E Yakushev, S Rozov, The plateau de Bure neutron monitor: design, operation and Monte Carlo simulation, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, (2012), 59, 2, 303-313.