

## ОТЗЫВ

официального оппонента

ОЛЬШЕВСКОГО Александра Григорьевича

на диссертацию АЙНУТДИНОВА Владимира Маратовича

на тему «Кластер Baikal-GVD – основная структурная единица Байкальского глубоководного нейтринного телескопа»,

представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Вопрос о природе источников космических лучей высоких энергий является одним из важнейших в астрофизике высоких энергий. Вследствие сравнительно интенсивного взаимодействия адронов и электромагнитного излучения с веществом, физика космических лучей и гамма-астрономия могут дать лишь модельно зависимое представление о природе физических процессов, протекающих в центральных областях астрономических объектов, обладающих достаточно высокой плотностью: от обычных планет и звезд до плотных ядер активных галактик. Напротив, нейтринное излучение беспрепятственно распространяется от источника до земного наблюдателя. Таким образом, регистрация нейтрино от локальных источников, либо измерение диффузного потока нейтрино высоких энергий от совокупности источников, позволит определить класс астрономических объектов, ответственных за образование космических лучей и исследовать протекающие в них физические процессы.

Метод детектирования нейтрино высоких энергий основан на регистрации черенковского излучения заряженных частиц, образующихся в результате взаимодействия нейтрино в прозрачных естественных средах. Этот метод открывает возможность создания глубоководных нейтринных телескопов масштаба кубических километров, способных регистрировать природные потоки нейтрино высоких энергий внеземного происхождения. Идея глубоководной регистрации была с успехом реализована на Южном полюсе в эксперименте IceCube, где в качестве регистрирующей среды объемом  $\sim 1 \text{ км}^3$  использовался антарктический лед. В этом эксперименте впервые были зарегистрированы «астрофизические» нейтрино высоких энергий, что ознаменовало рождение экспериментальной нейтринной астрономии и подтвердило необходимость создания нейтринных телескопов аналогичного масштаба и в Северном полушарии.

Диссертация Айнутдинова В.М. как раз посвящена вопросу создания нейтринного телескопа объемом  $\sim 1 \text{ км}^3$  в оз. Байкал и актуальность и новизна описанного в ней исследования не вызывают никаких сомнений.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографии, списка сокращений и иллюстративного материала. Она содержит 106 рисунков и 11 таблиц. Общий объем диссертации 217 страниц. Библиография включает 110 наименований.

**Во введении** обозначены цели и задачи диссертационной работы, приведены положения, выносимые на защиту, представлены данные об апробации работы и личном вкладе автора. Приводится обоснование актуальности работы и ее новизны.

**В первой главе** рассмотрены физические задачи, на решение которых ориентированы нейтринные телескопы, описаны принцип работы и особенности регистрирующей системы этих установок и представлена история развития нейтринной астрофизики в целом: от проекта DUMAND (семидесятые годы прошлого века) до первых астрофизических нейтрино, зарегистрированных детектором IceCube в 2010-2016 гг. В заключительной части главы сопоставлены условия работы и технические особенности современных действующих и проектируемых крупномасштабных нейтринных телескопов.

**Вторая глава** посвящена вопросам разработки регистрирующей системы нейтринного телескопа, оптимизированной для работы в условиях оз. Байкал. В ней сформулированы требования к конструкции и техническим параметрам детектора, определяющиеся как физическими задачами, так и особенностями местоположения, способа развертывания и подготовки аппаратуры установки. Автором подчеркивается, что разработка архитектуры и аппаратных средств системы регистрации и сбора данных Baikal-GVD осуществлялась на основе опыта, накопленного при создании и эксплуатации установок НТ200 / НТ200+, что обеспечило возможность в сжатые сроки создать и исследовать базовые элементы Baikal-GVD: оптические модули, глубоководные модули системы сбора и передачи данных, блоки управления секциями и гирляндами. Во второй главе также представлены результаты оптимизации конфигурации Baikal-GVD, и результаты расчетов основных параметров установки: эффективной площади и объема для регистрации мюонов и каскадных ливней, а также точности восстановления параметров регистрируемых событий.

**В третьей главе** представлены результаты разработки и исследований фотодетектора Байкальского нейтринного телескопа: оптического модуля, созданного на базе ФЭУ R7081-100, оснащенного фотокатодом с повышенной квантовой чувствительностью. Автором показано, что характеристики разработанного прибора удовлетворяют общим требованиям, предъявляемым к фотодетекторам крупномасштабных нейтринных телескопов: чувствительность к световому потоку на уровне единичных фотонов, широкий динамический диапазон, разрешение по времени на уровне единиц наносекунд, наличие встроенной системы временной и амплитудной калибровки. В этой главе описывается методика и технология проверки, калибровки и паспортизации оптических модулей, обеспечивающая высокую скорость и надежность их подготовки в условиях массового производства.

**В четвертой главе** приводится описание системы сбора данных установки в целом, представлены принцип работы и технические характеристики ее основных элементов, обосновываются подходы, используемые при организации триггерной системы и системы передачи данных, зарегистрированных детектором.

**Пятая глава** посвящена экспериментальным исследованиям методов регистрации и обработки событий, разработанных для нейтринного телескопа. В ней представлены результаты долговременных натурных испытаний гирлянд Baikal-GVD и первого кластера телескопа, введенного в эксплуатацию в апреле 2015 года. Продемонстрирована корректность функционирования детектора в режимах регистрации физических событий и в условиях калибровки установки светодиодными и лазерными источниками света, приведены результаты измерения точности временной калибровки каналов, представлены экспериментальные оценки точности восстановления положения каскадных ливней и эффективности методики их выделения на фоне сигналов от атмосферных мюонов.

**В заключении** автор приводит основные результаты диссертационной работы, среди которых можно выделить:

1. В оз. Байкал смонтированы, налажены и введены в эксплуатацию в режиме постоянной экспозиции первые два кластера глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD с эффективным объемом для регистрации каскадных ливней 0,1 куб. км, представляющие собой одну из крупнейших установок Северного полушария.
2. Годовые испытания первого полномасштабного кластера нейтринного телескопа продемонстрировали работоспособность и устойчивость работы системы регистрации и сбора данных установки в режимах калибровки и регистрации мюонов и каскадных ливней.
3. Продемонстрирована возможность развертывания первой очереди установки GVD-1 с эффективным объемом 0,5 км<sup>3</sup> в течение 3 - 4 лет и доказана возможность длительной эксплуатации аппаратуры нейтринного телескопа.

Все результаты диссертации являются достоверными и обоснованными. Основные результаты диссертации В.М. Айнутдинова опубликованы в 32 работах, в том числе в 23 статьях в рецензируемых международных журналах и российских научных изданиях, рекомендованных ВАК. Результаты работы неоднократно докладывались лично соискателем на международных и российских научных конференциях и семинарах. Основные положения, выносимые на защиту, отражают личный вклад автора в опубликованных работах.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

В качестве замечаний к диссертационной работе В.М. Айнутдинова можно отметить:

1. В работе не представлены данные по долговременной стабильности калибровочных коэффициентов измерительных каналов, которые, в частности, могли бы характеризовать один из ключевых параметров установки: стабильность характеристик фотокатодов и диодной системы используемых в проекте фотоэлектронных умножителей.
2. Использование оптических линий связи в установке ограничивается только сегментом, связывающим кластер с береговым центром сбора данных. Передача информации в пределах кластера осуществляется по электрическим кабелям, что ограничивает скорость передачи данных и может снижать надежность работы системы в целом. Причины, по которым не используются оптоволоконные линии, в работе подробно не обсуждаются.

3. Одним из принципиальных вопросов при проектировании установок такого масштаба с ограниченным доступом для ремонта и замены аппаратуры является вопрос надежности её отдельных узлов и их компонент. При этом обычно используются как теоретические методы оценки параметра «наработки на отказ», так и испытания в условиях ускоренного температурного «старения». На мой взгляд, этому вопросу в диссертации уделяется недостаточное внимание.

Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Айнутдинова В.М. Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне. Результаты работы представляют собой существенный вклад в нейтринную астрофизику и открывают новые перспективы изучения свойств источников нейтрино высоких энергий. Личный вклад автора не вызывает сомнений.

Диссертация Айнутдинова В.М. на тему: «Кластер Baikal-GVD – основная структурная единица Байкальского глубоководного нейтринного телескопа» полностью соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утверждённом постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики, а её автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Официальный оппонент:

начальник Научно-экспериментального отдела физики  
элементарных частиц Лаборатории ядерных проблем  
Объединенного института ядерных исследований,  
доктор физико-математических наук, профессор

Ольшевский А.Г.  
30.01.2018

Подпись Ольшевского А.Г. заверяю:  
Ученый секретарь Лаборатории ядерных проблем  
Объединенного института ядерных исследований,  
кандидат физико-математических наук

Титкова И.В.

Ольшевский Александр Григорьевич

Профессор, начальник Научно-экспериментального отдела физики элементарных частиц  
Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Доктор физико-математических наук, специальность 01.04.16 - физика атомного ядра. и  
элементарных частиц.

Телефон: +7 (49621) 6-50-59 Email: olshevsk@gmail.com

Адрес: 141980, ул. Жолио-Кюри, 6, г. Дубна, Московская обл., Россия, Международная  
межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований.

Список основных публикаций по теме диссертации за последние 5 лет:

1. P. Adamson, C. Ader, ..., A. Olshevskiy et al. (NOvA Collaboration). "Search for active-sterile neutrino mixing using neutral-current interactions in NOvA". Phys. Rev. D96 (2017) no.7, 072006.
2. P. Adamson, C. Ader, ..., A. Olshevskiy et al. (NOvA Collaboration). "First measurement of muon-neutrino disappearance in NOvA". Phys. Rev. D93 (2016) no.5, 051104.
3. P. Adamson, C. Ader, ..., A. Olshevskiy et al. (NOvA Collaboration). "First measurement of electron neutrino appearance in NOvA". Phys.Rev.Lett. 116 (2016) no.15, 151806.
4. F. P. Ana, J. Z. Baib, ..., A. Olshevskiy et al. (Daya Bay Collaboration). "Evolution of the Reactor Antineutrino Flux and Spectrum at Daya Bay". Phys.Rev.Lett. 118 (2017) no.25, 251801.
5. F. P. Ana, J. Z. Baib, ..., A. Olshevskiy et al. (Daya Bay Collaboration). "The Detector System of The Daya Bay Reactor Neutrino Experiment". Nucl. Instrum. Meth. A811 (2016) 133-161.
6. Fengpeng An, Guangpeng An, ..., Alexander Olshevskiy et al. (JUNO Collaboration). "Neutrino Physics with JUNO", J. Phys. G43 (2016) no.3, 030401.