

## ОТЗЫВ

официального оппонента Денисова Сергея Петровича на диссертацию Айнутдинова Владимира Маратовича « **Кластер Baikal-GVD – основная структурная единица Байкальского глубоководного нейтринного телескопа**», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 приборы и методы экспериментальной физики.

### **Актуальность темы исследования**

Диссертационная работа Владимира Маратовича Айнутдинова посвящена изучению методов регистрации космических нейтрино высоких энергий по черенковскому излучению продуктов их взаимодействия в водной среде с целью создания кластера и разработке научно-технического проекта Байкальского глубоководного нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба на озере Байкал (проект Baikal-GVD) для астрофизических исследований. Астрофизика – одно из самых бурно развивающихся научных направлений в настоящее время, в котором за последние годы был получен целый ряд важнейших результатов (наиболее яркий пример – открытие гравитационных волн). Есть несколько причин повышенного интереса к астрофизическим исследованиям. Одна из них – тесная связь явлений во Вселенной с процессами и закономерностями в микромире. Мы не знаем причину наблюдаемой асимметрии вещества и антивещества во Вселенной. Но, возможно, разгадка кроется в нарушении одной из фундаментальных симметрий в микромире. Мы не знаем, что такое «тёмная материя» во Вселенной, но не исключено, что она состоит из слабовзаимодействующих массивных частиц (WIMP), поиски которых ведутся в экспериментах в физике частиц. Особое место среди астрофизических исследований занимает изучение потоков нейтрино от галактических и внегалактических источников. Дело в том, что нейтрино, как слабовзаимодействующая частица, несёт наименее искажённую информацию о процессах в глубинах Вселенной. Поэтому не случайно за последние 10-20 лет в мире создано несколько крупномасштабных установок, в том числе подводных, для ре-

гистрации космических нейтрино. Таким образом, разработка методов регистрации нейтрино высокой энергии, является безусловно важной и актуальной научной задачей не только для астрофизики, но и для физики частиц.

Нельзя не отметить, что идея использования естественных водоёмов как радиаторов черенковского излучения космических частиц принадлежит академику М.А.Маркову, а практические работы по созданию глубоководной установки на оз. Байкал начались по предложению академика А.Е.Чудакова.

### **Структура и содержание работы**

Диссертация состоит из Введения, пяти глав и Заключения. Во Введении обоснованы цели, научная новизна, актуальность и практическая важность проведённых исследований. Первая глава представляет собой обзор по истории, современному состоянию, проведённым исследованиям и перспективам развития крупных нейтринных установок, использующим черенковское излучение в естественных средах для регистрации нейтрино. К ним относятся Нейтринный Телескоп на оз. Байкал NT200, AMANDA и IceCube в Антарктиде, ANTARES и KM3NeT в Средиземном море и проектируемый Baikal-GVD, причём наибольшее внимание уделяется детектору IceCube, в котором (как и в установке AMANDA) в качестве радиатора черенковского излучения используется лёд.

Во второй главе описаны установки NT200 и её модернизированный вариант NT200+ и их использование для отработки элементов детектора Baikal-GVD. В частности, были исследованы оптические модули с ф.э.у с большими фотокатодами и впервые опробована электроника для оцифровки формы сигналов с ф.э.у с частотой дискретизации в сотни МГц. Последнее дало возможность довести временное разрешение установки до приемлемой величины  $\sim 2$  нс. Создание и исследование в рабочих условиях характеристик экспериментальной гирлянды из новых оптических модулей позволило в сжатые сроки подготовить научно-технический проект нейтринного телескопа Baikal-GVD.

Глава 3 посвящена детальному описанию конструкции и физических и технических характеристик оптического модуля (ОМ) – одного из основных элементов телескопа Baikal-GVD. Для калибровки ОМ использовались светодиоды и генератор сигналов, имитирующих импульсы ФЭУ. Для управления работой ОМ был разработан специальный контроллер. Следует отметить простоту конструкции модуля и хорошо продуманную систему его проверки и настройки, что позволило достаточно быстро подготовить 600 ОМ для первых кластеров Baikal-GVD.

Система сбора данных описана в Главе 4. Помимо электроники передачи данных эта система включает электронику формирования триггера и временных кадров событий и оцифровки аналоговых сигналов ОМ. Она также используется для управления режимами работы аппаратуры и контроля состояния всех частей установки. При разработке системы сбора данных диссертант проявил себя как высококвалифицированный специалист в области современной электроники.

В последней Главе представлены основные результаты долговременных и всесторонних испытаний кластеров из гирлянд ОМ в рабочих условиях на озере Байкал, включая данные по стабильности и надежности работы аппаратуры. Испытания показали правильность выбранных решений по всем системам кластера Baikal-GVD, и он может быть использован как основная структурная единица Байкальского глубоководного нейтринного телескопа.

В Заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы. Структура диссертации представляется весьма логичной, а её содержание полностью соответствует поставленной цели – созданию полномасштабного кластера для установки Baikal-GVD.

### **Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и теме диссертации**

Диссертационная работа посвящена разработке, созданию и испытаниям экспериментальной аппаратуры, включая детекторы черенковского излучения, регистрирующую электронику и электронику сбора информации и контроля парамет-

ров детекторов, что полностью соответствует теме диссертации и заявленной специальности – приборы и методы экспериментальной физики.

### **Соответствие автореферата содержанию диссертации**

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

### **Личный вклад соискателя в получение результатов исследования**

Личный вклад соискателя в получение основных результатов диссертационной работы является решающим. Он принимал непосредственное участие во всех исследованиях в рамках диссертационной работы, включая обработку и анализ данных. Под его руководством были разработаны как отдельные элементы, так и общая концепция установки Baikal-GVD. В.М. Айнутдинов был научным руководителем трех кандидатских диссертаций, темы которых связаны с настоящей диссертацией. Он неоднократно представлял результаты работ, вошедших в диссертацию, на крупных конференциях и симпозиумах.

### **Степень достоверности результатов диссертационной работы**

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждена детальными исследованиями характеристик разработанной аппаратуры, проведенными как на стендах, так и в рабочих условиях на Байкале. Кроме того, материалы диссертации докладывались на международных конференциях и получили высокую оценку. Они опубликованы в ведущих реферируемых журналах.

### **Теоретическая и практическая значимость полученных автором диссертации результатов**

Значимость полученных автором диссертации методических результатов достаточно высокая. Они будут использоваться прежде всего при разработке новых крупномасштабных астрофизических установок. Результаты, полученные в эксперименте Baikal-GVD, несомненно окажутся полезными, например, для проверки современных теоретических представлений о механизме генерации нейтрино высоких энергий во Вселенной.

## **Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Основной результат диссертации – создание и исследование характеристик кластера Baikal-GVD – планируется использовать для создания полномасштабного детектора объёмом  $1 \text{ км}^3$ . Методики, разработанные в процессе выполнения диссертационной работы, могут оказаться полезными при создании установок как в России, например, в ИФВЭ (Протвино) и ОИЯИ (Дубна), так и за рубежом.

### **Новизна полученных результатов**

1. Впервые создан глубоководный оптический модуль на основе фотоэлектронного умножителя с полусферическим фотокатодом диаметром 250 мм и высокой квантовой чувствительностью ( $\sim 35\%$ ). Предложенная конструкция может быть использована в установках, в которых требуется регистрация слабых световых потоков.
2. Разработан новый подход к организации систем сбора данных и контроля параметров распределённой системы детекторов, основанный на применении локальных сетей с использованием удлинителей Ethernet.
3. Предложена и реализована оригинальная методика, улучшающая точность определения временных и амплитудных параметров сигналов с ф.э.у. и базирующаяся на оцифровке формы сигналов.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Триггерная система установки предназначена для подавления событий, инициированных шумовыми срабатываниями ФЭУ и фоновым свечением воды оз. Байкал. К сожалению, в работе не приводится информация о доле фоновых событий в общем потоке данных, поступающих с детектора. Такая информация, в частности, позволила бы оценить один из ключевых параметров триггерной системы: отношение сигнал – фон.

2. При расчете фона для регистрации каскадных ливней, инициированных нейтрино, не учтен вклад мюонов прямой генерации, который может быть существенным в области энергий каскадов 100 и более ТэВ.

3. В диссертации указывается, что детектор на оз. Байкал ориентирован не только на решение физических задач, но и позволяет проводить исследования в других областях науки и техники: гидрологии, гидроакустики, лимнологии. Однако методика и цели проведения подобных исследований в работе не обсуждаются.

4. Следовало бы подробнее описать, для чего планируется создать установку Baikal-GVD, т.е. программу физических исследований.

Сделанные замечания не влияют на общую высокую оценку диссертационной работы.

### **Заключение по диссертации**

Диссертация Айнутдинова Владимира Маратовича на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 является завершённой научно-исследовательской работой, в которой содержится решение важной и актуальной научной задачи по созданию кластера детекторов для регистрации черенковского излучения, образованного при взаимодействии космических нейтрино высокой энергии с водной средой озера Байкал. Её результаты имеют существенное значение не только для создания уникальной установки Baikal-GVD с полезным объёмом  $1 \text{ км}^3$ , но для развития методики экспериментов как в области астрофизики, так и физики частиц, в том числе на современных ускорителях и коллайдерах. На всех этапах диссертационной работы В.М.Айнутдинов проявил себя как физик-экспериментатор самой высокой квалификации. Диссертация полностью соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 приборы и методы экспериментальной физики.

Отзыв составил:

Денисов Сергей Петрович,  
доктор физико-математических наук,  
профессор, академик РАН,  
главный научный сотрудник Отделения экспериментальной физики Федерально-  
го государственного бюджетного учреждения «Институт физики высоких энергий  
имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский  
институт»,  
шифр и наименование специальности: 01.04.23 – физика высоких энергий.  
142280 г. Протвино Московской обл., ул. Строителей д.17, кв.1, Россия.  
denisov@ihep.ru

С.П. Денисов

« 30 » января 2018 г.

Подпись Денисова С.П. заверяю.

Ученый секретарь Диссертационного Совета

НИЦ "Курчатовский институт"- ИФВЭ

Ю.Г. Рябов

Денисов Сергей Петрович

Профессор, академик РАН, главный научный сотрудник Отделения экспериментальной физики Федерального государственного бюджетного учреждения «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Доктор физико-математических наук, специальность 01.04.23 – физика высоких энергий.

Телефон: (4967)713776 Email: denisov@ihep.ru

Адрес: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова», 142280, г. Протвино Московской обл., ул. Строителей д.17, кв.1, Россия.

Список основных публикаций оппонента по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

№ пп	Наименование	Название издательства, журнала (номер, год) или номер авторского свидетельства	Фамилии соавторов работы
1.	Measurement of the W boson mass with the D0 detector.	Phys. Rev. D 89 (2014) 012005	D0 Collaboration V.M.Abazov et al.
2.	Jet energy scale determination in the D0 experiment.	Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. A763 (2014) 442	D0 Collaboration V.M.Abazov et al.
3.	New results of experiments at the Tevatron.	Pis'ma v Zhurnal Fizika Elementarnykh Chastits i Atomnogo Yadra 2(186) (2014)272-284	S.P.Denisov A.A.Shchukin
4.	Временное, энергетическое и координатное разрешения сцинтилляционного счетчика при регистрации протонов с энергиями 25–206 МэВ.	Ядерная физика и инжиниринг 9-10, 5 (2014) 847	Горячев В.Н.. С.П.Денисов и др.
5.	ПРИМЕНЕНИЕ ЧЕРЕНКОВСКИХ СЧЁТЧИКОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА УСКОРИТЕЛЯХ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЧАСТИЦ.	УФН 185, 5 (2015) 515	С.П.Денисов
6.	Тор-кварк (к 20-летию открытия).	УФН 185, 12 (2015) 1241	Э.Э.Боос, О.Е.Брандт, Д.С.Денисов, С.П.Денисов, П.Д.Граннис

	THE TOP QUARK (20 YEARS AFTER THE DISCOVERY).	PHYSICS-USPEKHI 58(2015) 1133–1158	E.E.Boos, O.E.Brandt, D.S.Denisov, S.P.Denisov, P.D.Grannis
7.	SEARCH FOR NEW RESONANCES IN EVENTS WITH ONE LEPTON AND MISSING TRANSVERSE MOMENTUM IN $pp$ COLLISIONS AT $\sqrt{s} = 13$ TEV WITH THE ATLAS DETECTOR.	Phys.Lett. B 762 (2016) 334-352	ATLAS Collabora- tion M.Aaboud et al.
8.	Charged-particle distributions in $pp$ interactions at $\sqrt{s} = 8$ TeV measured with the ATLAS detector.	Eur.Phys.J. C76 (2016) no.7, 403	ATLAS Collabora- tion G.Aad et al.
9.	О возможности прецизионного измерения дифференциального сечения упругого $pp$ -рассеяния на ускорителе ИФБЭ.	Ядерная физика 79(2016)121-128	С.П.Денисов, А.В.Козелов, В.А.Петров
10.	Measurement of top quark polarization in $t\bar{t}$ lepton+jets final states	Phys.Rev. D 95(2017)011101(R)	D0 Collaboration V.M.Abazov et al.
11.	COMBINATION OF D0 MEASUREMENTS OF THE TOP QUARK MASS.	Phys.Rev. D 95(2017)112004	D0 Collaboration V.M.Abazov et al.
12.	A measurement of the calorimeter response to single hadrons and determination of the jet energy scale uncertainty using LHC Run-1 $pp$ -collision data with the ATLAS detector.	Eur.Phys.J. C77(2017) no.1, 26	ATLAS Collabora- tion M.Aaboud et al.
13.	Performance of the ATLAS Trigger System in 2015.	Eur.Phys.J. C77 (2017) no.5, 317	ATLAS Collabora- tion M.Aaboud et al.