

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

**ФИЗИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ**



*имени
П.Н. Лебедева*

Российской академии наук

Ф И А Н

119991, ГСП-1, Москва,
Ленинский проспект, 53, ФИАН

Телефоны: (499) 135 1429

(499) 135 4264

Телефакс: (499) 135 7880

<http://www.lebedev.ru>

postmaster@lebedev.ru

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Физического института
им. П.Н. Лебедева РАН,
доктор физ.-мат. наук

_____ В.А. Рябов

25 января 2018 г.

Дата

№

ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук – на диссертацию Айнутдинова Владимира Маратовича “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.

Диссертационная работа Айнутдинова В.М. посвящена разработке, созданию и исследованиям характеристик глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD масштаба кубического километра. Телескоп Baikal-GVD предназначен для решения ключевых междисциплинарных проблем современного естествознания - поиска и определения источников и механизмов происхождения космических частиц высоких и сверхвысоких энергий, изучения свойств элементарных частиц и астрофизических объектов.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, списка иллюстративного материала и таблиц. Общий объем диссертации составляет 217 страниц, включая 106 рисунков, 11 таблиц и список цитируемой литературы из 110 ссылок.

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируются цель и основные задачи исследования. Излагается научная и практическая значимость полученных результатов диссертационной работы. Перечисляются положения, выносимые на защиту, и указываются данные об апробации работы и личном вкладе автора.

В первой главе обсуждаются состояние и перспективы развития крупномасштабных детекторов черенковского излучения в естественных средах - нейтринных телескопов. Важнейшим этапом в развитии исследований природных потоков нейтрино высоких энергий является регистрация первых нейтринных событий в эксперименте IceCube, позволившая экспериментально определить величину потока нейтрино и необходимый уровень чувствительности экспериментов.

Во второй главе представлены основные этапы и результаты исследований, направленных на разработку и создание нейтринного телескопа в оз. Байкал, общая концепция детектора и конфигурация его регистрирующей системы. Концепция Baikal-GVD основана на том, что нейтринный телескоп будет представлять собой пространственную структуру фотодетекторов, сгруппированных в кластеры. Каждый кластер является функционально независимым детектором, способным регистрировать нейтринные события как самостоятельно, так и в составе полномасштабного телескопа. В конце главы представлены характеристики первой очереди Baikal-GVD (GVD-1) с эффективным объемом $\sim 0,5 \text{ км}^3$.

Третья глава посвящена фотодетекторам телескопа - оптическим модулям (ОМ). Представлены конструкция оптических модулей, описание электронных систем, технические характеристики и результаты

исследований их параметров. В общей сложности около 600 ОМ было подготовлено и установлено в составе Baikal-GVD в период 2012 – 2017 гг. Методика подготовки и тестирования ОМ описывается в заключительной части главы.

В четвертой главе представлена архитектура и характеристики системы сбора данных Baikal-GVD. Описываются принцип работы и техническая реализация основных структурных элементов системы сбора данных: измерительного канала, секции оптических модулей, гирлянды и кластера гирлянд.

В пятой главе представлены результаты натурных исследований работы нейтринного телескопа Baikal-GVD, включающих в себя проверку корректности функционирования основных элементов и систем телескопа в режиме долговременной экспозиции, оценку их стабильности и надежности, анализ качества экспериментального материала, полученного на установке в режимах калибровки и регистрации мюонов и каскадных ливней.

В заключении приводятся основные результаты выполненной работы.

Содержание диссертации отражает научные результаты и положения, выносимые на защиту, и свидетельствует о личном вкладе автора в работу.

Актуальность диссертационной работы

Изучение галактических и внегалактических источников и механизмов генерации нейтрино сверхвысоких энергий является актуальной задачей в области астрофизики элементарных частиц. В последние два десятилетия наблюдается бурное развитие физики частиц, а также астрофизики и космологии, изучающих процессы, протекающие при энергиях недоступных ускорителям. Это нашло свое отражение в создании ряда крупномасштабных детекторов (нейтринных телескопов), предназначенных для решения широкого круга научных задач. Наиболее значимыми задачами являются исследования высокоэнергичных процессов в астрофизических объектах с помощью регистрации потоков нейтрино высоких энергий, исследования

фундаментальных физических проблем (в том числе поиск нейтрино, образующихся в результате аннигиляции или распада частиц темной материи), изучение космических лучей с помощью атмосферных мюонов, мониторинг Галактики для регистрации нейтрино от вспышек сверхновых.

В настоящее время единственным детектором, на котором были зарегистрированы нейтрино высокой энергии астрофизической природы, является установка IceCube, расположенная на Южном полюсе. Потребность в телескопах, расположенных как в Южном, так и в Северном полушариях, обусловлена зависимостью их угловой апертуры от энергии нейтрино. В области энергий ниже ПэВ, в силу высокого уровня фоновых событий от атмосферных мюонов, выделение нейтринных событий возможно лишь для нейтрино приходящих из-под горизонта. В области энергий выше ПэВ фон от атмосферных мюонов становится приемлемым для регистрации нейтрино сверху, однако, для нейтрино таких энергий Земля является непрозрачной и апертура телескопа оказывается ограниченной для событий снизу.

Таким образом, находящиеся на этапе создания Байкальский телескоп Baikal-GVD и средиземноморский KM3NeT, которые расположены в Северном полушарии, и действующий детектор IceCube на Южном полюсе формируют мировую сеть установок, нацеленных на поиск и исследование источников нейтрино высоких и сверхвысоких энергий на всей небесной сфере.

Основные результаты

Из основных результатов диссертационной работы, которые имеют научную новизну и значимость, можно выделить следующие:

1. Создание нового фотодетектора (оптического модуля) для нейтринного телескопа Baikal-GVD на базе ФЭУ R7081-100, оснащенного системами управления, калибровки и мониторинга его параметров и обеспечивающего эффективную регистрацию слабых черенковских вспышек, генерируемых релятивистскими заряженными частицами.

2. Разработку комплекса физической аппаратуры, включающего в свой состав глубоководные модули и межмодульные коммуникации, обеспечивающие регистрацию сигналов, выработку триггера, формирование временных кадров событий, предварительную обработку и передачу информации в Береговой центр сбора данных, калибровку каналов установки, управление электропитанием всех узлов детектора.
3. Ввод в эксплуатацию в режиме постоянной экспозиции первых двух кластеров телескопа Baikal-GVD с суммарным эффективным объемом 0,1 куб. км, представляющих собой на настоящий момент времени один из крупнейших нейтринных телескопов Северного полушария.

Научная новизна полученных результатов

Впервые в Северном полушарии создана установка, позволяющая регистрировать нейтрино высоких энергий от астрофизических источников. По мере своего развития установка позволит превзойти IceCube по важнейшей характеристике – угловому разрешению, что открывает реальные возможности по развитию нового научного направления “нейтринная астрономия”.

Практическая значимость работы

Создание и ввод в эксплуатацию двух кластеров Baikal-GVD с суммарным эффективным объемом 0,1 км³ открывает новые возможности для проведения исследований в области физики космических лучей и нейтринной астрофизики. Создание полномасштабного нейтринного телескопа в оз. Байкал позволит не только увеличить крайне ограниченную в настоящее время статистику нейтринных событий астрофизической природы, но и расширить круг поиска нейтринных источников на всю небесную сферу.

Замечания по работе

1. Данные о событиях, регистрируемых измерительными каналами нейтринного телескопа, включают в себя информацию о форме выходного

импульса ФЭУ. Это приводит к существенному увеличению объема данных и предъявляет повышенные требования к быстродействию системы передачи информации. В то же время в проекте КМЗNeT измерение формы импульса не предполагается. К сожалению, в работе не рассматривается вопрос о необходимости измерения формы импульсов и о том, какие преимущества дает эта дополнительная информация по сравнению с традиционным подходом: измерением только времени прихода и заряда регистрируемых сигналов.

2. Предварительная калибровка временных и амплитудных параметров оптических модулей и измерительных каналов осуществляется в лабораторных условиях. В то же время в составе установки аппаратура работает при существенно более низких температурах. В работе не представлены исследования влияния изменения температуры эксплуатации на параметры аппаратуры. Так же было бы полезно исследовать зависимость временных задержек глубоководных кабелей от давления.

3. К сожалению, в представленной диссертационной работе в ряде случаев отсутствуют ссылки на описания и техническую документацию на приборы, используемые в системе сбора данных нейтринного телескопа (микросхемы, модемы и т. д.).

4. В работе встречаются опечатки. В частности, на рис. 3.2.5 (стр. 109) в подписи вертикальной оси вместо логарифмической шкалы указана линейная.

Общая оценка работы

Указанные замечания не снижают общую высокую оценку работы. Результаты работы соответствуют поставленной цели и решаемым задачам. Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации.

Результаты диссертации опубликованы в ведущих рецензируемых российских и зарубежных журналах, неоднократно докладывались автором на российских и международных конференциях. Опубликованные статьи полностью раскрывают содержание диссертации.

Таким образом, диссертация В.М. Айнутдинова “Кластер Baikal-GVD – основная структурная единица Байкальского глубоководного нейтринного телескопа” соответствует всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, установленным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утверждённом постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, а сам Владимир Маратович Айнутдинов заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Диссертационная работа Айнутдинова В.М. заслушана на семинаре Отдела космических излучений ФИАН Отделения ядерной физики и астрофизики 12 декабря 2017 г.

Отзыв на диссертацию, подготовленный д.ф.-м.н. Шауловым С.Б., рассмотрен и одобрен на заседании Ученого совета Отделения ядерной физики и астрофизики ФИАН «26» декабря 2017 г., протокол № 62.

Отзыв составил:

Ведущий научный сотрудник

Отделения ядерной физики и астрофизики ФИАН,

д.ф.-м.н., профессор

Сергей Борисович Шаулов

Председатель Ученого совета

Отделения ядерной физики и астрофизики ФИАН,

д.ф.- м.н., профессор

Олег Дмитриевич Далькаров

Секретарь Ученого совета

Отделения ядерной физики и астрофизики ФИАН,

к. ф.-м. н.

Николай Петрович Топчиев

Адрес организации: 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН).

тел.: 8(499)135-42-64

<http://www.lebedev.ru/>

факс: 8(499)135-78-80

postmaster@lebedev.ru

Сведения о ведущей организации

по диссертации Айнутдинова Владимира Маратовича
«Кластер Baikal-GVD – основная структурная единица Байкальского
глубоководного нейтринного телескопа» на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и
методы экспериментальной физики.

Полное название организации в соответствии с уставом	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук
Сокращенное название	ФИАН
Адрес	119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53
Телефон	8(499)135-42-64
Вебсайт	http://www.lebedev.ru/
Сведения о руководителе, на имя которого нужно оформить письмо	Директор ФИАН, член-корреспондент РАН, Колачевский Николай Николаевич
Сведения о лице, который составил отзыв	Д.ф.-м.н. Шаулов Сергей Борисович e-mail: shaul@sci.lebedev.ru
Наименование структурного подразделения, составляющего отзыв	Отделение ядерной физики и астрофизики
Список публикаций работников структурного подразделения, составляющего отзыв, за последние 5 лет, по теме диссертации (не более 15) 1. Borisov A.S., Chubenko A.P., Dalkarov, O.D.,..., Ryabov V.A. et al. HADRON-55 complex setup for study of hadron interactions within the central part of EAS cores. Proceedings of Science. 2015, v. 30. p. 570.	

2. Leonov A.A., Galper A.M., Bonvicini V., Topchiev N.P., Suchkov S.I., et al. Separation of electrons and protons in the GAMMA-400 gamma-ray telescope. *Advances in Space Research*. 2015, v. 56, p. 1538.
3. Erlykin A.D., Wolfendale A.W. The spectral shapes of hydrogen and helium nuclei in cosmic rays. *Phys.G: Nucl.Part. Phys.* 2015, v.42, p. 075201.
4. Gurevich A.V., Antonova V.P., Chubenko A.P., Karashtin A.N., et.al. The time structure of neutron emission during atmospheric discharge. *Atmospheric Research*, 2015, v.164–165, p.339.
5. Chubenko A.P., Shepetov A.L., Beisembayev R.U., Borisov A.S., et al. New complex EAS installation of the Tien Shan mountain cosmic ray station. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2016, v. 832, p. 158.
6. Ryabov V.A., Chechin V.A., Gusev G.A. Prospects for ultrahigh-energy particle observation based on the lunar orbital LORD space experiment., *Advances in Space Research*. 2016, v. 58, p.464.
7. Gurevich A.V., Almenova A.M., Antonova V.P., ..., Ryabov V.A. et al. Observations of high-energy radiation during thunderstorms at Tien-Shan. *Physical Review D*. 2016, v. 94, 023003.
8. Далькаров О.Д., Котельников К.А., Котельников С.К. Elliptic flow в ядерном взаимодействии астрочастицы с энергией 10^{16} эВ. *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2016. т. 80, № 5, с. 607.
9. Далькаров О.Д., Котельников К.А., Котельников С.К., Садыков Т.Х., Трубкин Ю.А. Телеизмерения процесса прохождения атмосферы земли астрочастицами с энергиями выше 10^{15} эВ. *Краткие сообщения по физике Физического института им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук*. 2016, т. 43, № 8, с. 11.
10. Гудкова Е.Н., Нестерова Н.М., Никольская Н.М., Павлюченко В.П.. Энергетический спектр первичного космического излучения при энергиях $2 \cdot 10^{13}$ - $5 \cdot 10^{17}$ эВ по данным Тянь-Шаня». *Изв. РАН. Сер. физ.*

2017. т. 81, №4, с. 492.

11. Shaulov S.B., Beyl P.F., Beysembaev R.U., ..., Ryabov V.A., et al.
Investigation of EAS cores. EPJ Web of Conferences. 2017, v. 145. p.17001.
12. Ryabov V.A., Almenova A.M., Antonova, V.P., et al. Modern status of the
Tien-Shan cosmic ray station. EPJ Web of Conferences. 2017, v.145.
p.12001.
13. Beznosko D., Beisembaev R., Baigarin K., et al. Extensive Air Showers with
unusual structure. EPJ Web of Conferences. 2017, v.145. p.14001.
14. Пучков В.С., Пятовский С.Е.. Природа гамма-семейств с гало,
регистрируемых в экспериментах с рентгеноэмульсионными камерами.
Ядерная физика. 2018, т.81, №2, с.1.
15. Pavlyuchenko V.P., Martirosov R.M., Nikolskaya N.M., Erlykin A.D.J.
Difference method to search for the anisotropy of the primary cosmic
radiation. Phys.G: Nucl. Part. Phys. 2018, v. 45, 015202.