

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию В.М. Айнутдинова «Кластер Baikal-GVD — основная структурная единица Байкальского глубоководного нейтринного телескопа» представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01- приборы и методы экспериментальной физики.

Диссертация В.М. Айнутдинова «Кластер Baikal-GVD — основная структурная единица Байкальского глубоководного нейтринного телескопа» посвящена актуальному вопросу астрофизики и космологии, связанных с физикой элементарных частиц, обладающих энергией, недоступной современным ускорителям. Особое место в этих исследованиях занимает поиск астрофизических источников нейтрино высокой энергии, изучение связи физики нейтрино с физикой темной материи. В последние годы исследование физики нейтрино проводится с помощью экспериментальных установок промышленного масштаба и развитие методов экспериментальной физики и создание новых приборов имеет первостепенное значение для успеха фундаментальных физических исследований. Так, например, физическая задача поиска астрофизических источников нейтрино высоких энергий потребовало создания установки, измеряющей вторичные продукты взаимодействия нейтрино в воде объемом около кубического километра. Такой детектор создан в Южном полушарии (детектор Ice Cube), где есть природное преимущество для его создания: прозрачный массив льда в Антарктиде. Актуальной задачей стало построение установки подобного масштаба в Северном полушарии с тем, чтобы охватить измерениями всю небесную

сферу. В России подходящими условиями для построения такой установки обладают глубокие прозрачные воды озера Байкал. Есть также важное преимущество нейтринного детектора, расположенного в Северном полушарии – он способен вести практически непрерывное наблюдение центра Галактики (18 часов в течение суток) и Галактической плоскости, где сконцентрирована основная часть потенциальных галактических источников космических лучей и нейтрино.

Общая концепция нового нейтринного телескопа Baikal-GVD в Северном полушарии была разработана на основании опыта, накопленного при создании и эксплуатации нейтринного детектора NT200. Возможность проведения натурных испытаний новой регистрирующей аппаратуры Baikal-GVD на действующей установке, используя инфраструктуру Байкальской нейтринной обсерватории явилась ключевым фактором, позволившем автору диссертации, непосредственно руководившем работой, в сжатые сроки (2006 – 2016 гг) создать кластер установки Baikal-GVD. Результаты этой работы доказывают возможность построения установки с масштабом порядка кубического километра воды при использовании преимуществ глубоководных детекторов в озере Байкал. Диссертация В.М. Айнутдинова подводит итоги этой работы, открывающей новое направление в экспериментальном изучении нейтрино высоких энергий и связанных с ними астрофизических задач.

Содержание диссертации изложено в 5 главах общим объемом 217 стр. в соответствии с различным характером проведенной работы. Автор обладает широким знанием экспериментальных методов области физики элементарных частиц, что позволило ему разработать установку для

изучения нейтрино высокой энергии с параметрами, близкими или превосходящими параметры существующих мировых установок такого класса: IceCube, ANTARES, NESTOR, NEMO, KM3Net.

Важной задачей работы было обеспечение массового изготовления огромного количества (тысячи) оптических модулей обладающих высокой надежностью работы глубоко в воде Байкала. В 2016 г. первая часть установки ВАИКАЛ-GVD, содержащая около 300 модулей, начала работать и дала первые результаты об атмосферных нейтрино и мюонах.

Не менее важно было разработать и создать общую схему работы нейтринного телескопа с оптическими модулями на глубине около 1300 м в озере Байкал и ее центром на берегу озера на расстоянии порядка 5 км от ее глубоководной части.

В диссертации подробно рассмотрены электронные схемы регистрации сигналов в каждом оптическом модуле, их накопления на промежуточных станциях, находящихся в непосредственной близости к глубоководным «гирляндам» оптических модулей. Преимуществом выполненной работы является разработка метода сбора информации об амплитуде сигнала и его времени, зарегистрированной в каждом оптическом модуле, в едином центре. Этот метод позволяет использовать всю полученную информацию от модулей для отбора и анализа событий взаимодействия нейтрино с водой, применяя различные параметры отбора для различных типов нейтрино и продуктов их взаимодействия.

Разработанный временной график развертывания нейтринного телескопа включает два этапа. На первом этапе (до 2020 года) планируется развернуть установку GVD-1 с характерными размерами $\sim 0,5 \text{ км}^3$, содержащую $\sim 2 \cdot 10^3$ оптических модулей. Выбор оптимальной

конфигурации, а также оценка светосилы и разрешающей способности GVD-1 были основаны на результатах моделирования отклика телескопа на черенковское излучение мюонов и ливней. Для глубинных вод оз. Байкал характерными являются длина поглощения 22 – 25 м и длина рассеяния 30 – 50 м. Длина рассеяния света в байкальской воде более чем на порядок превышает соответствующую величину в антарктическом льду. Благодаря этому глубоководный телескоп Baikal-GVD обладает повышенной чувствительностью при изучении потока нейтрино со сравнительно малой энергией $\sim 10^2$ ТэВ. Детектор Байкал-GVD имеет также преимущество в сравнительно низком уровне биологического свечения по сравнению с морской водой детектора KM3Net. Эти особенности Байкальского телескопа позволяют не только проводить поиск источников «астрофизических» нейтрино, но и вести исследование угловой анизотропии диффузного потока нейтрино.

Дальнейшее развитие детектора предполагает его наращивание до масштабов $\sim 10^4$ оптических модулей. На основании проведенных экспериментальных исследований характеристик регистрирующей аппаратуры и модельных расчетов был подготовлен «Научно-технический проект глубоководного нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба на оз. Байкал».

В диссертационной работе В.М. Айнутдинова представлены результаты натурных испытаний работы нейтринного телескопа Baikal-GVD. Программа испытаний включает 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 различных режимах ее работы. Работающий кластер

установки Baikal-GVD показал высокую надежность работы каналов литектора (отказы в работе порядка 1% на канал. В течение года работы было проведено 622 серии измерений. Живое время экспозиции составило 213 дней. За время измерения было зарегистрировано $1,8 \cdot 10^9$ событий. Большую часть событий составляют «атмосферные» мюоны, генерированные космическими лучами приходящими к атмосфере в Северном полушарии. Из этого набора данных было выделено одно событие, в котором 24 сработавших модуля дают сигналы, соответствующие регистрации каскада с энергией около 100 ТэВ, генерированного атмосферным мюоном. В диссертации приводится также пример регистрации мюона, генерированного нейтрино, пересекающего Землю. Ограниченная статистика обработанных экспериментальных данных пока не позволяет судить о доле нейтринных событий с разным лептонным числом.

К недостаткам представленной работы можно отнести сравнительно скупое описание экспериментальных результатов на Кластере Baikal-GVD, уже проработавшем более года. Интерес представляют даже верхние пределы значения интенсивности астрофизических нейтрино от известных источников космических лучей. Экстраполяция полученной статистики событий, подкрепленная возможной интерпретацией эксперимента, дала бы убедительное подтверждение важности создания полномасштабной установки Baikal-GVD.

Было бы справедливо уделить внимание роли коллаборации других институтов РФ и зарубежных университетов, участвующих в коллаборации Baikal.

Отмеченные недостатки не снижают общую оценку проделанной автором работы. Изложенные в диссертации результаты позволяют развивать важнейшее для астрофизики и физики элементарных частиц направление экспериментального исследования нейтрино высоких энергий. Диссертация В.М. Айнутдинова полностью соответствует требованиям ВАК к докторским диссертациям, содержание автореферата соответствует содержанию диссертации, а сам В.М. Айнутдинов за создание глубоководной установки по изучению нейтрино высоких энергий в Северном полушарии с параметрами, равными или даже превосходящими параметры, имеющиеся на других мировых нейтринных установках, заслуживает присвоения ученой степени доктора физико-математических наук.

Доктор физико-математических наук, ведущий научный
сотрудник НИИЯФ МГУ

Б.А. Хренов

24.01.2018

Подпись руки Бориса Аркадьевича Хренова заверяю
Директор НИИЯФ МГУ доктор физико-математических наук,
профессор

М.И. Панасюк

Хренов Борис Аркадьевич

Ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова отдела космических наук, лаборатории частиц сверхвысоких энергий.

Доктор физико-математических наук по специальности 01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц.

Адрес: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2.
«Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени
Д.В.Скобельцына.

Тел.: +7(495)939-18-18 Email: bkhrenov@yandex.ru

Список основных публикаций за последние 5 лет:

1. G.Abdellaoui, S.Abe, ..., B. Khrenov et al. “Cosmic ray oriented performance studies for the JEM-EUSO first level trigger”. Nucl. Instrum. Meth. A866 (2017) 150-163.
2. V. Grebenyuk, V. Boreiko, ..., B. Khrenov et al. “Ground-based complex for checking the optical system”. Phys. Part. Nucl. Lett. 13 (2016) no.5, 579-582.
3. V. A. Sadovnichii, M. I. Panasyuk, ..., B. A. Khrenov et al. “Lomonosov” Satellite—Space Observatory to Study Extreme Phenomena in Space”. Space Sci. Rev. 212 (2017) no.3-4, 1705-1738.
4. P.A. Klimov, M.I. Panasyuk, B.A. Khrenov et al. “The TUS detector of extreme energy cosmic rays on board the Lomonosov satellite” Space Sci. Rev. 212 (2017) no.3-4, 1687-1703.
5. A.Grinyuk, V.Grebenyuk, B.Khrenov et al. “The orbital TUS detector simulation”. Astropart. Phys. 90 (2017) 93-97.
6. G.K. Garibov, M.Yu. Zotov, ..., B.A. Khrenov et al. “The KLYPVE ultrahigh energy cosmic ray detector on board the ISS”, Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 79 (2015) no.3, 326-328, Izv. Ross. Akad. Nauk Ser. Fiz. 79 (2015) no.3, 358-361.