

«УТВЕРЖДАЮ»
проректор
Московского государственного
университета имени М.В.Ломоносова
профессор А.А.Федянин

« 17 » ноября 2016 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации,

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В.Скобельцына на диссертацию **АВРОРИНА Александра Дмитриевича «Регистрация мюонов на глубоководном нейтринном телескопе BAIKAL-GVD»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 — Приборы и методы экспериментальной физики.

Диссертация А.Д. Аврорина посвящена **актуальной** проблеме нейтринной астрофизики высоких энергий - созданию в Северном полушарии детектора(ов), способного(ых) вести изучение центра нашей Галактики. До недавнего времени уровень нейтринной астрофизики определялся результатами экспериментальных исследований на Байкальском глубоководном нейтринном телескопе NT200, на детекторе AMANDA на Южном полюсе и на детекторе ANTARES в Средиземном море. В 2011 году на Южном полюсе был введен в строй детектор IceCube, который, благодаря увеличению на один-два порядка чувствительности эксперимента, позволил впервые в мире зарегистрировать нейтрино высоких энергий (события Ernie и Bert) с энергиями около 1 ПэВ. Задача создания в Северном полушарии детектора(ов), способного(ых) вести изучение центра нашей Галактики на уровне чувствительности, соизмеримой с детектором IceCube, но с гораздо лучшим угловым разрешением восстановления мюонных траекторий, безусловна актуальна. Обоснованием для разработки водных кубокилометровых нейтринных телескопов, наблюдающих южное небо, является тот факт, что длина рассеяния света в антарктическом льду мала по сравнению с озёрной и морской водой. С этой целью на озере Байкал создаётся детектор кубокилометрового масштаба Baikal-GVD, где в 2015 г. завершено создание первого базового элемента - кластера из 8 гирлянд с 36 оптическими модулями на каждой гирлянде.

Целью диссертационной работы является разработка и программная реализация алгоритмов анализа мюонных событий, зарегистрированных Baikal-GVD. Использование автором диссертации для обработки больших массивов данных специализированных библиотек и языков программирования позволило на порядки увеличить скорость проведения научных исследований в области нейтринной астрофизики высоких энергий. Особую актуальность работе А.Д.Аврорина придают планы создания Глобальной сети

нейтринных телескопов, о которой 13 октября 2013 года было подписано соглашение между Baikal-GVD, IceCube, ANTARES и KM3Net.

Для реализации этой цели А.Д.Аврорин

1. Глубоко проанализировал методы и подходы для регистрации мюонов, используемые в крупномасштабных черенковских экспериментах (на Байкальском глубоководном нейтринном телескопе НТ-200 и НТ-200+, детекторе AMANDA и IceCube на Южном полюсе, детекторе ANTARES в Средиземном море).
2. Разработал модульную архитектуру системы обработки данных BARS, состоящую из блоков с унифицированным форматом входных и промежуточных данных. Это обеспечивает исследователям доступ к данным на любой стадии их анализа. Такая архитектура дает возможность создавать приложения для каждого из блоков без перенастройки всей системы.
3. Оптимизировал работу триггерной системы BaikalGVD для регистрации мюонов (эффективная площадь кластера для мюонов с энергией 10 ТэВ составляет $\sim 2 \times 10^4 \text{ м}^2$) в условиях ограничения на пропускную способность системы сбора и передачи данных..
4. Разработал алгоритмы и программное обеспечение калибровки данных по времени, заряду и амплитуде. Для подавления шумов в диссертации был использован метод причинности - подход, разработанный для НТ-200 и предназначенный прежде всего для выделения мюонных событий.
5. Разработал и использовал программное обеспечение для обработки данных акустической системы позиционирования оптических модулей в момент регистрации в Baikal-GVD.
6. В диссертации впервые разработана, опробована и реализована методика мюонной калибровки каналов.
7. Проанализировал эффективность разработанных алгоритмов и программного обеспечения с использованием экспериментальных данных по мюонам в экспозиции 2013-2014 гг..

Созданная в ходе работы система обработки позволила впервые начать обработку событий эксперимента Baikal-GVD с использованием информации, полученной с использованием 1-ого кластера, состоящего из 8 гирлянд и 36x8 оптических модулей. При этом автор принимал участие в создании, монтаже и настройке оборудования кластера на озере Байкал в 2013-2015гг.. Проведенные автором к настоящему времени работы по обработке экспериментальных данных позволили подготовить банк данных Baikal-GVD для проведения физического анализа мюонных событий.

Использование специализированных языков программирования и библиотек в области обработки больших массивов данных позволило на порядки увеличить скорость обработки и ввести дополнительные возможности анализа для научных исследований в области нейтринной астрофизики высоких энергий. Все предложенные в результате исследований алгоритмы, архитектура системы обработки данных, калибровки и восстановления событий используются для обработки данных действующего кластера телескопа Baikal-GVD. Результаты работы были использованы как для настройки и тестирования вновь устанавливаемых систем телескопа, так и для регистрации мюонных событий и решения других исследовательских задач. Это доказывает несомненную **практическую значимость** работы.

Научная новизна работы определяется тем, что впервые разработаны алгоритмы и программы, обеспечивающие мюонную калибровку данных и восстановление мюонных событий для создаваемой на озере Байкал уникальной установки - нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба Baikal-GVD. Впервые была разработана архитектура системы обработки данных BARS, состоящая из блоков с унифицированным форматом входных и промежуточных данных. Гибкость, модульная структура обеспечивают доступ исследователям к информации на любой стадии обработки данных и являются необходимым шагом создания системы «открытых данных», которая необходима для эффективной работы в Глобальной сети нейтринных телескопов.

В обоснованности результатов работы сомнений не возникает. При выборе подходов и решений, используемых автором диссертации при разработке и программной реализации алгоритмов обработки мюонных событий, зарегистрированных Baikal-GVD, автор опирался на опыт, накопленный при работе четырех крупномасштабных нейтринных телескопов: NT-200, AMANDA, IceCube и ANTARES. Кроме того, Baikal-GVD – является следующим этапом развития Байкальской нейтринной обсерватории (БНО). Этот проект является продолжением детекторов NT-200 и NT-200+и использует опыт, приобретенный при их эксплуатации. Все детали создания и настройки системы, а также разработки программного обеспечения, подробно изложены в тексте и снабжены иллюстративным материалом. **Достоверность** решений, предложенных диссертантом, подтверждается позитивными результатами восстановления мюонных событий Baikal-GVD.

Результаты работы неоднократно докладывались на российских и международных конференциях и рабочих совещаниях коллаборации Байкал (2012-2016), а также опубликованы в виде 5 работ в рецензируемых международных и российских журналах. Диссертация выполнена на высоком научном уровне, автором продемонстрированы эрудиция и глубокие знания по нейтринной физике, о чем свидетельствуют содержательные обзоры первых глав о методах регистрации мюонов на 4-х детекторах NT-200, AMANDA, IceCube и ANTARES. Автор также продемонстрировал хорошее знание устройства кластера установки Baikal-GVD, системы сбора данных и триггерной системы телескопа, а также квалификацию в создании современного программного обеспечения. Выводы работы представляются достаточно убедительными.

К недостаткам работы следует отнести следующее:

1. Для лучшего понимания полученных в диссертации результатов было бы полезным сопроводить главы 3, 4, 5 выводами по главам.
2. В главе 3 разделе 3.1 приводятся аргументы в пользу создания в проекте Baikal - GVD собственной системы обработки данных. Соглашаясь в целом с приведенной аргументацией, остается неясным вопрос о системе «открытых данных», которая необходима для эффективной работы в Глобальной сети нейтринных мониторов. Не осложнит ли в будущем использование специального пакета для анализа данных Baikal-GVD координации работы с IceCube, ANTARES и KM3Net ?
3. В диссертации автор продемонстрировал работоспособность созданного им программного обеспечения и эффективность системы подготовки данных в Baikal-GVD к физическому анализу. Однако, на настоящем этапе сам анализ не мог быть

проведен в полном объеме. Представленные в диссертации результаты свелись к демонстрации двух восстановленных мюонных событий. В этой связи более удачным было бы назвать диссертацию «Реконструкция мюонных событий на глубоководном нейтринном телескопе Baikal-GVD».

4. К сожалению, в диссертации и автореферате имеются грамматические и синтаксические погрешности.

Несмотря на отмеченные недостатки диссертация Аврорина А.Д. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором разработок и исследований был создан комплекс программ, позволяющий проводить исследования в нейтринной астрофизике высоких энергий.

Полученные разработки могут быть использованы в ОИЯИ, ФИАН им.П.Н.Лебедева, НИИЯФ МГУ и других организациях, задействованных в проведении крупных экспериментов, накапливающих обширные базы экспериментальных данных.

Диссертация Аврорина Александра Дмитриевича соответствует всем критериям, установленным положением о порядке присуждения ученых степеней, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 — приборы и методы экспериментальной физики, за разработку архитектуры системы обработки и анализа данных Байкальского эксперимента: программной платформы BARS, а также подготовку банка данных BAIKAL-GVD для проведения физического анализа мюонных событий.

Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертации.

Материалы диссертации доложены и одобрены на семинаре НИИЯФ МГУ: «Астрофизика космических лучей» (руководитель семинара д.ф.м.н. М.И.Панасюк) 26 октября 2016 г. Отзыв обсужден и одобрен на заседании совета Отдела космических наук НИИЯФ МГУ 26 октября 2016 г..

Директор НИИЯФ МГУ
профессор

/Панасюк М.И./

Отзыв составлен зав. лабораторией
д.ф.-м.н.

/Роганова Т.М./

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына.

119234, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2.

Тел.: +7(495)939-18-18

Электронный адрес администрации института: info@sinp.msu.ru

Список работ сотрудников ведущей организации по теме диссертации за 2011-2016 гг.:

1. Agafonova N., Aleksandrov A., Anokhina A., Chernyavsky M., Chukanov A., Dmitrievski S., Dzhatdov T., Goloubkov D., Gornushkin Y., Malgin A., Matveev V., Okateva N., Olshevsky A., Podgrudkov D., Polukhina N., Roganova T., Rostovtseva I., Ryazhskaya O., Shakiryanova I., Shchedrina T., Sheshukov A., Shoziyoev G., Starkov N., Vladimirov M., Zaitsev Y., Zemskova S., the OPERA Collaboration Determination of the muon charge sign with the dipolar spectrometers of the OPERA experiment // Journal of Instrumentation, издательство Institute of Physics (United Kingdom), том 11, с. P07022 DOI:<http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/11/07/P07022>, 2016

2. Antonov R.A., Bonvech E.A., Chernov D.V., Podgrudkov D.A., Roganova T.M. The LED calibration system of the SPHERE-2 detector // Astroparticle Physics, издательство Elsevier BV (Netherlands), том 77, с. 55-65 DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.astropartphys.2016.01.004>, 2016

3. Agafonova N., Anokhina A., Dzhatdov T., Podgrudkov D., Roganova T., (OPERA Collaboration) Discovery of tau neutrino appearance in the CNGS neutrino beam with the OPERA experiment в журнале // Physical Review Letters, издательство American Physical Society (United States), с. 1-7 DOI: [10.1103/PhysRevLett.115.121802](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.121802), 2015

4. Agostini M., Altenmueller K., Appel S., Atroshchenko V., Bellini G., Benziger J., Bick D., Bonfini G., Bravo D., Caccianiga B., Calaprice F., Caminata A., Carlini M., Cavalcante P., Chepurnov A., Choi K., D'Angelo D., Davini S., de Kerret H., Derbin A., Noto L.Di, Drachnev I., Etenko A., Fomenko K., Franco D., Gabriele F., Galbiati C., Ghiano C., Giammarchi M., Goeger-Neff M., Goretti A., Gromov M., Hagner C., Hungerford E., Aldo Ianni, Andrea Ianni, Jany A., Jedrzejczak K., Jeschke D., Kobychiev V., Korablev D., Korga G., Kryn D., Laubenstein M., Lehnert B., Litvinovich E., Lombardi F., Lombardi P., Ludhova L., Lukyanchenko G., Machulin I., Manecki S., Maneschg W., Manuzio G., Marcocci S., Meroni E., Meyer M., Miramonti L., Misiaszek M., Montuschi M., Mosteiro P., Muratova V., Neumair B., Oberauer L., Obolensky M., Ortica F., Pallavicini M., Papp L., Pocar A., Ranucci G., Razeto A., Re A., Romani A., Roncin R., Rossi N., Scheonert S., Semenov D., Skorokhvatov M., Smirnov O., Sotnikov A., Sukhotin S., Suvorov Y., Tartaglia R., Testera G., Thurn J., Toropova M., Unzhakov E., Vishneva A., Vogelaar R.B., von Feilitzsch F., Wang H., Weinz S., Winter J., Wojcik M., Wurm M., Yokley Z., Zaimidoroga O., Zavatarelli S., Zuber K., Zuzel G. Borexino's search for low-energy neutrino and antineutrino signals correlated with gamma-ray bursts // Astroparticle Physics, издательство Elsevier BV (Netherlands), том 86, с. 11-17 DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.astropartphys.2016.10.004>, 2015

5. Ageron M., Aguilar J.A., Куликовский В., Shanidze R., Широков Е., Simeone F., Sottoriva A., Spies A., Spona T., Spurio M., Steijger J.J.M., Stolarczyk Th, Streeb K., Sulak L., Taiuti M., Yakovenko Y., Yepes H., Zaborova D., Zacccone H., Zornoza J.D., Zuniga J. ANTARES: The first undersea neutrino

telescope // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, издательство Elsevier BV (Netherlands), том 656, № 1, с. 11-38 DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2011.06.103>, 2011