

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук

Болоздыни Александра Ивановича

на диссертационную работу

Воронина Дмитрия Михайловича

«Разработка и создание калибровочных систем для экспериментов в астрофизике частиц»,

представленную в диссертационный совет 24.1.163.01 на базе

Института ядерных исследований Российской академии наук

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2. «Приборы и методы экспериментальной физики»

Актуальность работы

Диссертационная работа Воронина Д.М. посвящена актуальной задаче разработки и создания оптических калибровочных систем для черенковских и сцинтилляционных детекторов, используемых при постановке астрофизических экспериментов по исследованию космических лучей высоких и сверхвысоких энергий, наземной гамма-астрономии и нейтринной физике. Для надежной и стабильной работы таких детекторов необходимо контролировать эффективность регистрации фотонов, коэффициент усиления и временное разрешение детекторов, скорость счета импульсов темнового тока. Для решения этих задач необходимо создание калибровочных систем, включая источники фотонного излучения.

Эксперименты по исследованию космических лучей высоких и сверхвысоких энергий и наземной гамма-астрономии проводятся с помощью сложных установок, включающих комплексные детекторные системы для регистрации черенковского, флуоресцентного и сцинтилляционного излучений. Черенковские и флуоресцентные детектирующие установки регистрируют соответствующие излучения, производимые широкими атмосферными ливнями (ШАЛ) в атмосфере Земли. Сцинтилляционные детектирующие установки регистрируют электромагнитную, мюонную и адронную компоненты ШАЛ. Во всех этих установках используются фотонные детекторы для измерения энергии регистрируемых частиц. В качестве фотонных детекторов используются в основном, вакуумные и твердотельные фотоэлектронные умножители, а также фотодиоды и лавинные диоды.

Для надежной работы фотодетекторов необходимо контролировать их базовые параметры: эффективность регистрации фотонов, коэффициент усиления, временное разрешение, темновой ток. Необходимо также контролировать свойства детектирующих сред, включая световыход, прозрачность к собственному излучению, временные характеристики. Для решения всех этих задач необходимо создание калибровочных систем, включая специальные источники фотонного излучения.

В диссертационной работе Д.М. Воронина исследованы импульсные быстродействующие источники световых сигналов, а также радиоактивные источники, используемые для калибровки установок в фундаментальных экспериментах. Результаты испытаний обсуждены в диссертации.

Текст диссертации содержит 132 страницы и состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка используемой литературы. В тексте содержится 108 рисунков и 1 таблица. Список литературы включает 153 наименования цитируемой литературы.

Введение посвящено обоснованию актуальности исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы. Во введении приводятся примеры применения калибровочных систем для известных экспериментов в области астрофизики частиц, изложены защищаемые научные положения, а также практическая значимость работы и новизна полученных результатов.

В первой главе приводятся описание светодиодных систем, разработанных для калибровочных измерений черенковских установок в эксперименте TAIGA. В результате проведения временной калибровки установки TAIGA-HiSCORE с помощью беспилотных летательных аппаратов были вычислены временные поправки и определено временное разрешение установки ~ 0.29 нс. Проведено тестирование фотоумножителей в сети узкоугольных телескопов TAIGA-IACT.

Во второй главе приведено описание калибровочной системы на базе быстродействующих светодиодных источников света и пластиковых оптоволоконных кабелей, которая была использована для массового тестирования малогабаритных фотоумножителей подземного эксперимента JUNO по регистрации реакторных электронных антинейтрино от двух АЭС (Тайшань и Янцзян) общей мощностью 26.6 ГВт в сцинтилляционном детекторе массой 20 кт. Всего было протестировано 26 тысяч ФЭУ типа XR72B22 и отсеяно 15 ФЭУ.

В третьей главе приводится описание калибровочных измерений полутонного прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа (ББНТ). Измерения проводились с помощью специально разработанной светодиодной системой и с радиоактивными источниками гамма-излучения. В полутонном прототипе используются 10-дюймовые фотоумножители HAMAMATSU R7081-100 WA-S70. Для проведения энергетической калибровки полутонного прототипа ББНТ была создана калибровочная система на базе контейнера для хранения радиоактивных источников, и были измерены энергетические отклики полутонного прототипа ББНТ от гамма-квантов радиоактивных источников ^{109}Cd , ^{22}Na , ^{133}Ba , ^{137}Cs и ^{60}Co .

Четвертая глава посвящена разработке и созданию детектора мюонного вето эксперимента по поиску аксионов BabyIAXO, на котором обрабатываются компоненты полномасштабной установки IAXO. Основной детекторной системы BabyIAXO является время-проекционная камера с выводом на Miromegas структуру, установленную на аноде. Установка BabyIAXO планируется к использованию в самостоятельном эксперименте для исследования аксионов с массой до 0.25 эВ на ускорительном комплексе DESY в Гамбурге. Для достижения требуемого уровня фона ($< 10^{-8}$ кэВ $^{-1}$ см $^{-2}$ с $^{-1}$) установка будет снабжена пассивной защитой и активной системой мюонного вето.

В заключении кратко сформулированы основные результаты, полученные в данной работе.

Научная новизна и практическая значимость работы: впервые в мире разработана, создана и успешно испытана в натуральных условиях калибровочная система с использованием наносекундных светодиодов высокой мощности, установленных на борту

беспилотных летательных аппаратов для временной калибровки широкоугольных черенковских детекторов широких атмосферных ливней. Впервые использованы ультрафиолетовые светодиоды высокой мощности в оптических калибровочных системах.

Достоверность полученных результатов подтверждается успешным использованием разработанных калибровочных систем в экспериментах TAIGA и ББНТ, в массовом тестировании фотоэлектронных умножителей для эксперимента JUNO, а также в тестовых измерениях вето-детектора для постановки эксперимента BabyIAXO.

Личный вклад. Вклад автора был определяющим в разработках и создании всех элементов калибровочных систем, описанных в диссертационной работе. Лично автором разработаны и созданы наносекундные источники света, бортовая электронная система беспилотных летательных аппаратов, системы оптоволоконных кабелей.

Публикации. Основные положения, выносимые на защиту, опубликованы в 10 работах, индексируемых в международных базах данных Web-of-Science и SCOPUS. Основные результаты работы докладывались автором на четырех международных и двух российских конференциях. Таким образом, можно сделать вывод о достоверности проведенных исследований и высокой степени обоснованности научных результатов и выводов, сформулированных в диссертации.

Вместе с тем, по мнению оппонента данной диссертационной работе присущи и некоторые недостатки:

1. В диссертационной работе приводятся результаты исследований, выполненных для проведения обширного спектра исследований в физике высоких энергий и элементарных частиц, начиная от космических частиц сверхвысоких энергий и ШАЛ и ускорительных экспериментов до нейтринных исследований на АЭС. Поражает широта спектра научной активности автора. Однако, это достижение, к сожалению, оплачено недостаточно подробным описанием проделанных работ в каждом отдельном случае из четырех рассмотренных базовых экспериментов.
2. При формулировке тематики исследований во Введении, а также в названии работы отсутствует указание на применение разработанных технологий калибровки оптических детекторов для регистрации элементарных частиц (электронных антинейтрино) относительно низких энергий в реакторном эксперименте JUNO.
3. В диссертационной работе не достает главы с обобщающим анализом всех разработок автора, использованных для калибровки и контроля над работоспособностью установок во всех рассмотренных экспериментах, в которых автор применил свои разработки.
4. По объему проделанной работы данная диссертационная работа после более подробного описания отдельных направлений экспериментальной активности и обобщающего анализа всех разработок могла бы рассчитывать на присуждение автору докторской степени.

Приведенные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы Д.М. Воронина. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации. При чтении материалов видно личное мнение и вклад автора в результаты проведенных исследовательских работ. Тема и содержание диссертации

соответствует паспорту специальности 1.3.2. «Приборы и методы экспериментальной физики».

Заключение оппонента.

Диссертация Воронина Дмитрия Михайловича «Разработка и создание калибровочных систем для экспериментов в астрофизике частиц» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой совокупность полученных результатов следует квалифицировать как решение важных научных проблем, связанных с постановкой экспериментов по физике элементарных частиц с использованием фотоэлектронных детекторов.

Диссертационная работа Д.М. Воронина полностью соответствует требованиям и критериям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата наук, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор Воронин Дмитрий Михайлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики.

Я, Болоздыня Александр Иванович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Воронина Дмитрия Михайловича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

Болоздыня Александр Иванович, доктор физико-математических наук
Специальность 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики
Адрес: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31

Телефон: +7 (495) 788-56-99, доб. 9015

Адрес электронной почты: AIBolozdynya@mephi.ru

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Заведующий научно-исследовательской межкафедральной лабораторией экспериментальной ядерной физики Института ядерной физики и технологий НИЯУ МИФИ

«20» марта 2025 г.

_____ А.И. Болоздыня

Подпись А.И. Болоздыни заверяю:
Заместитель начальника отдела
документационного обеспечения
НИЯУ МИФИ

_____ В.М. Самородова

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

1. Д.Ю. Акимов и др. Упругое когерентное рассеяние нейтрино на атомном ядре – недавно обнаруженный тип взаимодействия нейтрино низких энергий. *Успехи Физических Наук* 189 (2019) 173-186; <https://ufn.ru/ru/articles/2019/2/c/>; doi: 10.3367/UFNr.2018.05.038356.
2. Д.Ю. Акимов и др. Комплексный метод подготовки ксенона для использования в качестве рабочей среды двухфазного эмиссионного детектора РЭД-100. *Приборы и Техника Эксперимента*, 2019, №4, с. 5-11. <https://elibrary.ru/item.asp?id=38252866>; doi:10.1134/S0032816219040025.
3. S. Acharya et al. Study of J/ψ azimuthal anisotropy at forward rapidity in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV. *J. High Energ. Phys.* 02 (2019)012.
4. S. Acharya et al. Λ_c^+ production in Pb-Pb collisions at $s_{NN} = 5.02$ TeV. *Physics Letters B* 793 (2019) 212-223.
5. S. Acharya et al. Measurement of jet radial profiles in Pb-Pb collisions at $s_{NN}=2.76$ TeV. *Physics Letters B: Nuclear* 796 (2019) 204-219.
6. S. Acharya et al. Measurement of jet radial profiles in Pb-Pb collisions at root $s_{NN}=2.76$ TeV, *Physics Letters B* 796 (2019) 204-219; DOI: 10.1016/j.physletb.2019.07.020; <http://inspirehep.net/record/1732232>.
7. S. Acharya et al. Multiplicity dependence of light-flavor hadron production in pp collisions at root $s=7$ TeV, *Physical Review C* 99(2019)024906; DOI: 10.1103/physrevc.99.024906; <https://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/physrevc.99.024906>.
8. S. Acharya et al. Calibration of the photon spectrometer PHOS of the ALICE experiment, *Journal of Instrumentation* 14(2019)P05025; DOI: 10.1088/1748-0221/14/05/p05025; <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/14/05/p05025>
9. D. Yu. Akimov et al. A Passive Shield for the RED-100 Neutrino Detector. *Instruments and Experimental Techniques* 64 (2021) 202-208.
10. D. Yu. Akimov et al. The RED-100 experiment. *Journal of Instrumentation* 17 (2022) T11011.
11. D. Yu. Akimov et al. Using the Two-Phase Emission Detector RED-100 at NPP to Study Coherent Elastic Neutrinos Scattering off Nuclei. *Physics* 5 (2023) 492-498.
12. Д.Ю. Акимов и др. Электронный шум, генерируемый космическими мюонами в двухфазном ксеноновом эмиссионном детекторе РЭД-100. *Приборы и техника эксперимента* 2 (2023) 15-23.
13. I.S. Alexandrov et al. Upgrading the Cryogenic System of the RED-100 Emission Detector for Operation with Liquid Argon. *Instruments and Experimental Techniques* 67 (2024) 700-703.
14. D.Yu. Akimov et al. Calibration and characterization of the RED-100 detector at the Kalinin Nuclear Power Plant. *JINST* 19 (2024) T11004.
15. P.S. Barbeau, V. Belov, I. Bernardi, C. Bock, A. Bolozdynya et al. Accessing new physics with an undoped, cryogenic CsI CEvNS detector for COHERENT at the SNS. *Phys. Rev. D* 109 (2024) 092005.