

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу **Воронина Дмитрия Михайловича** «Разработка и создание калибровочных систем для экспериментов в астрофизике частиц», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Современные эксперименты по физике нейтрино, физике космических лучей и наземной гамма-астрономии высоких энергий требуют применения крупномасштабных установок, состоящих из большого количества детектирующих элементов, различных подсистем и т. д. Практически во всех таких установках так или иначе требуется регистрация фотонов (черенковское излучение, сцинтилляция). Эксплуатация таких установок требует применения различных калибровочных систем, которые обеспечивают надежную работу установок (путем контроля основных параметров эксперимента) и гарантируют получение достоверных физических результатов.

Целью настоящей работы являлись разработка и создание калибровочных систем для черенковских и сцинтилляционных установок экспериментов по исследованию физики космических лучей и наземной гамма-астрономии TAIGA, многоцелевого нейтринного эксперимента JUNO, прототипов Баксанского большого нейтринного телескопа (ББНТ) и эксперимента по поиску аксионов BabyIAXO. Все эти эксперименты находятся на передовой линии современной науки и обещают получить прорывные результаты в соответствующих областях. Так, например, в эксперименте JUNO планируется получить фундаментальные результаты в области нейтринной физики (определение иерархии нейтринных масс и прецизионное измерение параметров смешивания нейтрино), а в эксперименте BabyIAXO провести с высокой чувствительностью поиск аксиона, одного из кандидатов на роль темной материи. И все эти эксперименты нуждаются в надежных и эффективных калибровочных системах. Т.о. актуальность темы исследований не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка использованной литературы. Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

- 1) Значительная часть диссертационной работы посвящена разработке и созданию быстродействующих источников света на основе ультра-ярких и высокой мощности светодиодов. В созданных источниках света число фотонов в импульсе составило: для ультра-ярких светодиодов $\sim 10^{10}$; для светодиодов высокой мощности $\sim 10^{12}$. Достигнута длительность светового импульса: для ультра-ярких светодиодов ≤ 1 нс (FWHM); для светодиодов высокой мощности ~ 2.5 нс (FWHM).
- 2) С использованием разработанных наносекундных источников были проведены наземные калибровочные измерения черенковской установки TAIGA-HiSCORE.

- 3) Впервые в мире разработана и создана калибровочная система с использованием наносекундных светодиодов высокой мощности ($\sim 10^{12}$ фотонов в импульсе, 2.5-3 нс (FWHM) длительность импульсов, 1–20 Гц частота повторения импульсов) на борту беспилотных летательных аппаратов. Разработанная система была успешно протестирована в калибровочных измерениях широкоугольных черенковских установок эксперимента TAIGA.
- 4) Разработана и создана калибровочная система на основе ультра-ярких светодиодов и пластиковых оптоволокон для отбора, тестирования и исследования параметров 3-х дюймовых фотоумножителей эксперимента JUNO. Общее число каналов – 34; длительность световых импульсов ~ 1 нс (FWHM); диапазон регулирования световыхода источника $0 - 10^8$ фотонов на импульс; диапазон изменения частоты повторения импульсов 0-100 кГц. Данная калибровочная система была изготовлена в двух идентичных экземплярах и использована в массовом тестировании 3-дюймовых фотоумножителей для системы SPMT эксперимента JUNO. Всего протестировано в общей сложности более 26 тысяч фотоумножителей.
- 5) Для прототипов Баксанского большого нейтринного телескопа разработана и создана светодиодная калибровочная система на основе ультра-ярких светодиодов, пластиковых кабелей и диффузного рассеивателя света. С помощью разработанной системы проведена калибровка всех фотоумножителей полутонного прототипа проекта Баксанского большого нейтринного телескопа. Разработана, создана и опробована также калибровочная система с использованием радиоактивных источников.
- 6) Разработаны и созданы детектор мюонного вето на основе пластиковых сцинтилляторов для эксперимента по поиску аксионов BabyIAXO и светодиодная калибровочная система с пластиковыми оптоволоконными кабелями для этого детектора.

Достоверность и обоснованность результатов и выводов автора обеспечена правильным выбором методики, квалифицированным исполнением и обстоятельным анализом полученных результатов. Достоверность полученных результатов подтверждается также успешной эксплуатацией разработанных калибровочных систем в экспериментах TAIGA и ББНТ, в массовом тестировании фотоумножителей эксперимента JUNO, в тестовых измерениях вето-детектора эксперимента BabyIAXO. Все результаты, выносимые на защиту, являются новыми и оригинальными.

Результаты, полученные Ворониным Д.М., имеют несомненную научную и практическую ценность. Разработанные калибровочные системы уже нашли применение в экспериментах TAIGA, JUNO, ББНТ и BabyIAXO. Несомненно, что такие системы найдут применение и в других экспериментах и установках.

Диссертация практически не имеет недостатков. Единственное замечание - не указаны материал и конструкция светоотражателей, используемых при проведении калибровочных измерений оптических пунктов черенковской установки TAIGA-HiSCORE (Глава 1). Отсутствие этой информации, тем не менее, не снижает общей положительной оценки диссертационной работы.

В целом диссертация Воронина Д.М. является завершенным исследованием, выполнена на высоком научном уровне и свидетельствует о высокой квалификации автора.

Диссертационная работа основана на результатах, представленных на российских и международных конференциях, семинарах, совещаниях и опубликованных в авторитетных отечественных и зарубежных журналах. Диссертация написана ясным и понятным языком, текст снабжен качественными фотографиями, схемами и рисунками. Содержание автореферата полностью соответствует основным положениям диссертации.

Диссертация Воронина Д.М. выполнена на высоком научном уровне и удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, несомненно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 - Приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент:

Доктор физ.-мат. наук,

Начальник лаборатории «Физика слабых взаимодействий»

НИЦ «Курчатовский институт», ККТЭФ

(117218 Москва, ул Б.Черемушкинская 25; т. 499-7896468;

barabash@itep.ru)

А.С. Барабаш

19.03.2025

Подпись А.С. Барабаша заверяю:

Первый заместитель Главного ученого секретаря

НИЦ «Курчатовский институт»

К.Е. Борисов

Барабаш Александр Степанович

Специальность 01.04.16 - Физика атомного ядра и элементарных частиц.

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

1. I.J. Arnquist, F.T. Avignone, A.S. Barabash et al., Experimental study of $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ reactions in the MAJORANA DEMONSTRATOR calibration data, Phys. Rev. C 105 (2022) 064610.
2. I.J. Arnquist, F.T. Avignone, A.S. Barabash et al., Energy calibration of germanium detectors for the Majorana Demonstrator, JINST 18 (2023) P09023.
3. I.C. Bandac, A.S. Barabash, L. Berge et al., $\text{Li}_2^{100\text{depl}}\text{MoO}_4$ scintillating bolometers for rare-event search experiments, Sensors 2023, **23**, 5465.
4. A. Ahmine, I.C. Bandac, A.S. Barabash et al., Test of $^{116}\text{CdWO}_4$ and Li_2MoO_4 scintillating bolometers in the CROSS underground facility with upgraded detector suspension, JINST 2023, **18**, P12004.
5. I.J. Arnquist, F.T. Avignone, A.S. Barabash et al., Final result of the MAJORANA DEMONSTRATOR's search for neutrinoless double- β decay in ^{76}Ge , Phys. Rev. Lett. 2023, **130**, 062501.
6. I.J. Arnquist, F.T. Avignone, A.S. Barabash et al., Exotic Dark Matter Search with the MAJORANA DEMONSTRATOR, Phys. Rev. Lett. 2024, **132**, 041001.
7. I.J. Arnquist, A.S. Barabash, V. Berest et al., A novel mechanical design of a bolometric array for the CROSS double-beta decay experiment, JINST 2024, **19**, P09014.