

## ОТЗЫВ

**официального оппонента доктора физико-математических наук  
Рыкалина Владимира Ивановича на диссертационную работу  
Ушакова Никиты Андреевича**

**«Разработка и создание полутонного прототипа Баксанского  
большого нейтринного телескопа» на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук по специальности  
01.04.01 - «Приборы и методы экспериментальной физики»**

Диссертационная работа посвящена разработке, созданию и эксплуатации полутонного прототипа детектора нейтрино на основе жидкого органического сцинтиллятора.

Актуальность избранной темы определяется научными целями, решение которых обеспечит создание Баксанского большого нейтринного телескопа, например, измерение потока геонейтрино, позволяющее дать ответ на ряд вопросов о внутреннем устройстве, происхождении и эволюции Земли; регистрация солнечных нейтрино от CNO-цикла, измерение потока которых позволит определить с высокой точностью химический состав солнечных недр, что является особенно актуальным в контексте «проблемы металличности» Солнца; регистрация изотропного потока нейтрино, накопившихся во Вселенной в результате гравитационных коллапсов ядер массивных звезд и образования нейтронных звезд и черных дыр; изучение динамики взрыва сверхновой путем регистрации интенсивности и спектра нейтринной вспышки и др.

Целью диссертационной работы являлись разработка и создание полутонного прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа, включая разработку и создание жидкого органического сцинтиллятора; методов и средства отбора, тестирования и исследования параметров фотодетекторов; электронной системы регистрации событий прототипа; программного обеспечения для системы регистрации; а также осуществление физического запуска и изучение характеристик прототипа.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы.

**Введение** даёт обоснование актуальности создания нового жидко-сцинтилляционного нейтринного телескопа большого объёма, первым этапом которого является создания его полутонного прототипа, в нём сформулированы задачи и цели исследований, показаны новизна работы и ее практическая значимость.

**В первой главе** приводится краткий обзор методов регистрации нейтрино низких энергий (солнечные нейтрино, геонейтрино, реакторные нейтрино и нейтрино от сверхновых звёзд), а также основных экспериментов, направленных на их регистрацию, при этом особое внимание уделяется жидко-сцинтилляционным экспериментам.

**Во второй главе** описаны конструкция полутонного прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа и физические условия в месте его расположения.

В частности, приведены результаты измерений радиоактивного фона, как от окружающей среды, так и от элементов конструкции детектора, результаты измерений потока быстрых нейтронов, а также результаты расчёта потока реакторных нейтрино. Помимо этого, произведено моделирование отклика детектора.

**В третьей главе** описываются результаты разработки жидкого органического сцинтиллятора на основе линейного алкилбензола для полутонного прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа, а также описаны проведённые исследования по очистке данного сцинтиллятора, от различных, в том числе радиоактивных, примесей.

**Четвертая глава** диссертации посвящена системе регистрации детектора. В частности, описаны методы и результаты измерения основных характеристик фотодетекторов, фотоэлектронных умножителей, рассмотрена регистрирующая электроника, а также описано разработанное программное обеспечение.

**В пятой главе** описаны настройка, запуск и эксплуатация полутонного прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа, описана калибровка энергетического отклика детектора радиоактивными источниками, а также приведены результаты измерения потока мюонов вместе расположения детектора.

**В заключении** сформулированы основные результаты, полученные соискателем, заключающиеся в следующем:

1. Разработан и создан полутонный прототип проекта Баксанского большого нейтринного телескопа, основанного на использовании 500 литров жидкого сцинтиллятора на базе линейного алкилбензола в акриловой сфере диаметром 1 м, помещенной в водный черенковский детектор-вето (цилиндрический бак диаметром 2.4 м и высотой 2.8 м). Акриловая сфера с жидким сцинтиллятором просматривается 20-ю фотоумножителями R7081-100 WA-S70 с полусферическим окном диаметром 10 дюймов. Произведен физический запуск прототипа и осуществляется его успешная эксплуатация.

2. Разработан и создан жидкий органический сцинтиллятор для полутонного прототипа проекта ББНТ на основе линейного алкилбензола со сцинтилляционной добавкой PPO с концентрацией 2 г/л и со спектросмещающей добавкой bis-MSB с концентрацией 10 мг/л.

3. Разработана и создана электронная система регистрации событий полутонного прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа на базе электронных модулей CAEN: быстродействующих оцифровщиков импульсов V1730S, модулей программируемой логики V2495 и высоковольтных источников питания V6533. А также разработан и создан пакет программного обеспечения на языке программирования C++ с использованием фреймворка Qt для управления элементами электронной системы регистрации и для считывания, записи и обработки сигналов.

4. Разработаны и созданы методы и средства отбора, тестирования и исследования параметров фотоэлектронных умножителей и жидкого сцинтиллятора полутонного прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа.

5. Исследованы крупногабаритные вакуумные фотоумножители для использования в прототипах Баксанского большого нейтринного телескопа. Отобраны, протестированы и исследованы параметры фотоумножителей R7081-100WA-S70 производства Hamamatsu Photonics для полутонного прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа. Во всех исследованных фотоумножителях зарегистрированы послеимпульсы с аномально большими временами задержки от основных импульсов. Времена задержки от основного импульса этих послеимпульсов лежат в диапазоне 50–250 мкс.

Таким образом, поставленная цель по разработке и созданию полутонного прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа была достигнута. Осуществление проекта Баксанского большого нейтринного телескопа ввиду оптимального месторасположения телескопа позволит получить многоцелевой нейтринный детектор на новом уровне чувствительности. Создание полутонного прототипа позволяет решить задачи по выбору фотодетекторов, жидкого сцинтиллятора, активных и пассивных вето детектора, достижения низкого уровня внутренней радиоактивности материалов детектора и т.д. В диссертационной работе показано, что разработанный и созданный полутонный прототип в дальнейшем может быть удобной платформой для развития технологий создания сверхчистых высокоэффективных жидких органических сцинтилляторов, фотодетекторов с ультранизким уровнем внутренней радиоактивности, а также позволит тестировать фотодетекторы отечественного производства, тем самым способствуя возрождению разработок и производства фотодетекторов в России, родине вакуумных и твердотельных фотоумножителей.

Хотя в целом работа выполнена на высоком уровне, в ней имеются отдельные недостатки. Не считая нескольких описок, они приведены ниже.

1) Страница. 12, первый абзац. Реакция радиационного поглощения нейтрона ядрами кадмия написана правильно, но приведённая её трактовка - не совсем: дело в том, что испускается не один гамма-квант с энергией 3 – 10 МэВ, а несколько квантов с указанной энергией и средней множественностью 4. Аналогичная неточность имеет место и на странице 23 относительно радиационного захвата нейтрона  $^{157}\text{Gd}$ .

2) Страница 47, конец первого абзаца. Во фразе: “...необходима вторичная добавка, называемая шифтером.” более уместным было бы использование выражения: “...необходима вторичная спектрсмещающая добавка”.

3) Страница 48, предпоследний абзац. Остаётся неясным, почему нельзя сразу приготовить сцинтиллятор на основе LAB с необходимой концентрацией РОРОР, а не рассматривать вариант использования для этого концентрат РОРОР в LAB, что невозможно из-за недостаточной растворимости РОРОР?

4) Страница 73. Приведённая здесь трактовка причины появления пика послеимпульсов во временном распределении пролёта фотоэлектронов, гласящая, что выбитый из фотокатода фотоэлектрон может упруго рассеяться на первом

диноде, а потом снова вернуться к первому диноду и выбить из него вторичные электроны, требует более строгого подтверждения. Действительно, время пролёта таких электронов до анода согласно Рис. 4.14 составляет более 60 нс, что наводит на мысль о возможности оптической связи анодного узла ФЭУ с фотокатодом.

Перечисленные замечания не снижают общей крайне положительной оценки работы и проявленной высокой квалификации ее автора. Диссертация Ушакова Никиты Андреевича на соискание ученой степени кандидата наук является научно-квалификационной работой, в которой содержится описание процесса разработки и создания полутонного прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа - жидко-сцинтилляционного детектора, направленного на регистрацию нейтрино низких энергий.

Основные результаты диссертационной работы Ушакова Н.А. докладывались на международных конференциях и опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus и входящих в перечень ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации. Автореферат полностью отражает содержание диссертации и соответствует требованиям, предъявляемым ВАК.

Диссертация «Разработка и создание полутонного прототипа Баксанского большого нейтринного телескопа» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая удовлетворяет всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, а её автор, Ушаков Никита Андреевич, заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент,

Рыкалин Владимир Иванович, руководитель сектора сцинтилляционных и фотоэлектронных приборов, главный научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, профессор, доктор физико-математических наук.

e-mail: vladimir.rykalin@ihep.ru

тел.: +7 915 4272779

В.И. Рыкалин 22.08.2022г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ).  
142281, Московская обл., г. Протвино, площадь Науки, д. 1.

телефон: (4967) 71-36-23, факс: (4967) 74-28-24

<http://www.ihep.su>, e-mail: [fgbu@ihep.ru](mailto:fgbu@ihep.ru)

Подпись Рыкалина В.И. заверяю:

Заместитель директора по управлению персоналом

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ

О.В. Бажинова

## **Рыкалин Владимир Иванович**

Доктор физико-математических наук по специальности 01.04.01-  
Приборы и методы экспериментальной физики.

Список публикаций Рыкалина В.И. по теме диссертации Ушакова  
Н.А.:

- 1) A.Yu. Polyarush, S.A. Akimenko, ... V.I. Rykalin et al. Study of  $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu \gamma$  decay with OKA setup // Eur. Phys. J. C. — 2021. — Vol. 81, no. 2. — P. 161.
- 2) V. Brekhovskikh, A. Gorin, ... V. Rykalin. New Generation of Large Scale Scintillation Counters for Detection of EAS and Use in Guard Systems of Experimental Physics Setups // Physics of Atomic Nuclei. — 2019. — Vol. 82, no. 6. — P. 649.
- 3) V.I. Kravtsov, S.A. Akimenko, ... V.I. Rykalin et al. Measurement of the  $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \gamma$  decay form factors in the OKA experiment // Eur. Phys. J. C. — 2019. — Vol. 79, no. 7. — P. 635.
- 4) B. Adeva, L. Afanasyev, ... V. Rykalin et al. First Measurement of a Long-Lived  $\pi^+ \pi^-$  Atom Lifetime // Phys. Rev. Lett. — 2019. — Vol. 122, no. 8. — P. 082003.
- 5) A.S. Sadovsky, V.F. Kurshetsov, ... V.I. Rykalin et al. Search for heavy neutrino in  $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_H$  decay // Eur. Phys. J. C. — 2018. — Vol. 78, no. 2. — P. 92.
- 6) О.П. Ющенко, В.Ф. Куршецов, ... В.И. Рыкалин и др. Исследования  $K_{e3}$  распада в эксперименте OKA // Письма в ЖЭТФ. — 2018. — т. 107, вып. 3. — с. 147.
- 7) E. Cortina Gil, E. Martín Albarrán, ... V. Rykalin et al. The Beam and Detector of the NA62 Experiment at CERN // Journal of Instrumentation. — 2017. — Vol. 12, no. 5. — P. 05025.