

**ОТЗЫВ**  
**официального оппонента кандидата физико-математических наук**  
**Чепурнова Александра Сергеевича на диссертацию**  
**Федотова Сергея Андреевича**  
**«Разработка и создание детекторов заряженных частиц для каонных и нейтринных экспериментов»**

представленной на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности: 01.04.01 Приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация Федотова Сергея Андреевича посвящена разработке и созданию новых оригинальных детекторов заряженных частиц входящих, как принципиально важная составная часть, в большие современные детекторы для прецизионных каонных и нейтринных ускорительных экспериментов. Требования к повышению точности получаемых результатов в условиях повышения светимости ускорителей накладывают противоречивые требования на конструкцию детектора и требует одновременно глубокого понимания физических процессов, виртуозного владения современной техникой эксперимента и технической изобретательности. Изложенный в диссертации С.В Федотова материал является примером того, как правильно выбранная стратегия проведения исследования, включающая моделирование и последующее прототипирование приводит к блестящим уникальным результатам и появлению новых образцов детекторов заряженных частиц.

Приведенные в диссертации результаты и разработанные автором диссертации детекторы должны обеспечить существенное улучшение качества получаемых научных данных в таких уникальных экспериментах, как T2K и NA62, направленных на прорывные фундаментальные исследования физики нейтрино.

Приведенные в диссертации методы тестирования фотоприемников полезны для расширения представлений о методах регистрации фотонов и расширяют методологические основы определения физических параметров фотоприемников, что напрямую влияет на результаты работы сцинтилляционных детекторов, в которых фотоприемники применяются. Таким образом, разработанные методы определяющую роль играют в интерпретации измеренных данных, что напрямую влияет на физический результат.

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы. Содержит 133 страницы, включая 68 рисунков, 3 таблицы и 93 библиографические ссылки, в том числе 8 из которых относятся к основным публикациям автора по теме диссертационного исследования.

**Введение** обосновывает актуальность темы диссертации, излагается цель проведенного исследования и методы, перечисляются основные положения, выносимые на защиту, научная новизна, научная и практическая значимость, достоверность полученных результатов, апробация работы на конференциях, совещаниях, семинарах, а также личный вклад автора.

**Первая глава** представляет собой обзор истории физики нейтрино от предложенной в 1932 году Вольфгангом Паули гипотезы о существовании слабо взаимодействующего фермиона до открытия нейтринных осцилляций и экспериментального изучения феномена нейтринных осцилляций в ускорительных

экспериментах. Рассматривается общая классификация экспериментов по изучению нейтринных осцилляций.

Во **второй главе** описан ускорительный нейтринный эксперимент с длинной базой T2K. Подробно описана история эксперимента и полученные физические результаты, обсуждается дальнейшая модернизация детектора. В частности, обосновывается необходимость модернизации ближнего нейтринного детектора ND280 путем замены детектора нейтральный пионов P0D на новый высокосегментированный сцинтилляционный детектор SuperFGD и две горизонтальные TPC с целью уменьшить систематическую ошибку осцилляционных измерений с уровня в 6–7% до 3–4%. Именно в разработке детектора SuperFGD и принимал участие автор диссертации.

В этой же главе рассматривается проект детектора Hyper-Kamiokande и обсуждается как использование объединенных данных от ускорительных и атмосферных нейтрино позволят проверить современную теорию осцилляций с тремя поколениями нейтрино.

**Третья глава** посвящена описанию разработки и изготовления нового высокосегментированного сцинтилляционного детектора SuperFGD. Создание данного детектора является главной частью проекта по модернизации ближнего нейтринного детектора ND280 эксперимента T2K. Приводятся подробные описания конструкции созданных прототипов детектора и обосновываются выбранная конструкция с учетом технологичности изготовления и решения детектором заданной физической задачи. Обосновывается применяемая конструкция системы регистрации сцинтилляции через микропиксельные фотодиоды Hamamatsu MPPC. Обосновывается выбор конструкции системы сбора и обработки данных, полученных с фотоприемников. Отдельного внимания заслуживает описание технологических приемов, выбранных для изготовления элементов детектора и необходимых для создания высоконадежного детектора.

В третьей главе приведены результаты проведенных физических тестов прототипов детектора на пучках в CERN.

**В четвертой главе** приводятся описания и основные результаты специализированных экспериментов по поиску сверх редких каонных распадов.

**В пятой главе** детально описывается эксперимент по измерению вероятности сверх редкого каонного распада  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  NA62, приводятся результаты, полученные по итогам набора данных в 2016-2018 г.г. Обосновывается необходимость разработки нового вето-детектора ANTI-0, предназначенного для регистрации мюонного гало и обеспечивающего уменьшение фона в анализе данных по основному распаду. Далее приводятся результаты моделирования прохождения гало каонного пучка вдоль экспериментальной линии NA62. На основе проведенного моделирования рассматриваются варианты конструктивной реализации будущего детектора с учетом загрузки, которая будет возможна после перехода ускорительного комплекса в CERN в 2026 году к режиму высокой интенсивности.

**Шестая глава** посвящена еще одной подсистеме эксперимента NA62 - годоскопу заряженных частиц NewCHOD, который представляет собой однослойный сегментированный сцинтилляционный годоскоп, симметричный относительно оси пучка.

Приводятся результаты исследования характеристик, применяемых в подсистеме NewCHOD, фотосенсоров. Описана методика, установка и полученные результаты. Проведенная автором работа по параметризации фотосенсоров обеспечила успешный запуск детектора и его продолжительную работу с 2016 г и до плановой остановки детектора.

В **заключении** еще раз компактно и четко представлены полученные автором результаты и сформулированы выводы диссертации.

Актуальность и новизна приведенных в диссертации результатов не вызывает сомнений. Результаты опубликованы в реферируемых научных изданиях, индексируемых международными и российскими базами данных, и включенных в перечень, рекомендованный ВАК. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Следует особо отметить научную значимость данной работы. Созданный автором работы трехмерный сцинтилляционный детектор нейтрино SuperFGD должен значительно увеличить чувствительность эксперимента T2K для поиска CP-нарушения в лептонном секторе за счет уменьшения существующих систематических погрешностей с текущего уровня в 6–7% до 3–4%. Кроме того, данный детектор планируется использовать в проекте Hyper-Kamiokande. Автором предложен оригинальный метод восстановления энергии антинейтрино путем регистрации мюона и нейтрона в детекторе SuperFGD, это позволит улучшить энергетическое разрешение для мюонных антинейтрино до 7% относительно 15%, получаемых при использовании традиционных методов восстановления энергии нейтрино. Что касается второго разработанного автором детектора – NewCHOD, то его новая однослойная сегментированная сцинтилляционная структура позволила достичь почти в три раза лучшего временного разрешения, чем временное разрешение ранее использовавшегося детектора CHOD, обладающего двухслойной стриповой структурой

Считаю важным отметить практическую значимость данной работы. Описанные методики тестирования и определения параметров фотосенсоров могут быть рекомендованы для применения в других экспериментах, требующих массового использования многопиксельных фотосенсоров. Методика и практический опыт сборки механической конструкции из тысяч сцинтилляционных кубиков так же представляет несомненный практический интерес для создания будущих высокосегментированных сцинтилляционных детекторов, применение которых является одним из самых современных трендов и рассматривается многими научными группами в мире как основа будущих конструкций. Важно, что научно-технические методики разработанные автором в зарубежных экспериментах и с использованием зарубежной экспериментальной базы теперь есть в России и могут быть внедрены в будущие российские детекторы, создаваемые для исследований в области физики элементарных частиц и физики высоких энергий.

Материал в диссертации изложен ясно, хорошим научным языком, не содержит серьезных смысловых погрешностей и полно отражает содержание проделанной работы.

Несмотря на, безусловно, высокий уровень работы в целом, имеется несколько замечаний:

1. В диссертации практически нет данных о других экспериментах как нейтринных реакторных, так и по поиску редких распадов. Обзор литературы, посвященный аналогичным экспериментам мог бы быть на месте достаточно поверхностного теоретического введения в физику нейтрино (Глава 1), которое не очень информативно и выглядит слабо связанным с основным текстом диссертации.

2. Наблюдается некоторая неаккуратность при оформлении многих рисунков с графиками и статистическими данными. Они без обработки взяты из пакета обработки данных и прямо так как есть с данными на английском языке вставлены в рисунки. Подписи к таким рисункам не всегда достаточно информативны для понимания содержания рисунков.

3. Наблюдается некоторая небрежность в применяемой терминологии. Например в разделе 4.3 и 4.4 используется понятие световыход и для реального световыхода сцинтилляционного материала и для характеристики светосбора на фотоприемнике и для

характеризации ослабления в волокне. Следовало бы или ввести собственное определение термина световыход и его далее применять или использовать общепринятое понимание световыхода пластикового сцинтиллятора с пояснением как интерпретировать приведенные результаты.

Однако отмеченные выше недостатки не могут изменить положительного впечатления от работы и существенным образом повлиять на общую оценку диссертации Федотова Сергея Андреевича, которая представляет собой законченное исследование, выполненное на хорошем уровне и свидетельствующее о высокой квалификации автора. Защищаемые положения и выводы являются полностью обоснованными и их достоверность не вызывает сомнения.

Диссертация удовлетворяет требованиям ВАК и ГОСТ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Федотов Сергей Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Чепурнов Александр Сергеевич  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение «Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова», Научно-исследовательский  
институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцина  
119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1 стр.2  
Тел: +7 495 939 56 59, e-mail: [aschepurnov@yandex.ru](mailto:aschepurnov@yandex.ru)  
Отдел электромагнитных процессов и Взаимодействий  
в атомных ядрах, старший научный сотрудник.

Официальный оппонент  
Кандидат физико-математических наук

А.С. Чепурнов

11 сентября 2021 г.

Подпись с.н.с. ОЭПВАЯ НИИЯФ МГУ Чепурнова А.С. заверяю

Зам. директора по научной работе НИИЯФ МГУ Еременко Д.О. \_\_\_\_\_

13 сентября 2021 г.

**Чепурнов Александр Сергеевич**, кандидат физико-математических наук.

Специальность 01.04.01- Приборы и методы экспериментальной физики.

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

1. Agostini M., Altenmüller K., Chepurnov A. et al. Experimental evidence of neutrinos produced in the CNO fusion cycle in the Sun // *Nature*. 2020. Vol. 587. P. 577–582. arXiv: 2006.15115 [hep-ex].
2. Agarwalla S., Agostini M., Chepurnov A. et al. Constraints on flavordiagonal non-standard neutrino interactions from Borexino Phase-II // *JHEP*. 2020. Vol. 02. P. 038. arXiv: 1905.03512 [hep-ph].
3. Aalseth C. E., Abdelhakim S., Chepurnov A. et al. SiPM-matrix readout of two-phase argon detectors using electroluminescence in the visible and near infrared range // *Eur. Phys. J. C*. 2021. Vol. 81, No 2. P. 153. arXiv: 2004.02024 [physics.ins-det].
4. Agostini M., Altenmüller K., Chepurnov A. et al. Sensitivity to neutrinos from the solar CNO cycle in Borexino // *Eur. Phys. J. C*. 2020. Vol. 80, No 11. P. 1091. arXiv: 2005.12829 [hep-ex].
5. Agnes P., Albergo S., Chepurnov A. et al. Sensitivity of future liquid argon dark matter search experiments to core-collapse supernova neutrinos // *JCAP*. 2021. Vol. 03. P. 043. arXiv: 2011.07819 [astro-ph.HE].
6. Abusleme A., Adam T., Chepurnov A. et al. Optimization of the JUNO liquid scintillator composition using a Daya Bay antineutrino detector // *Nucl. Instrum. Meth. A*. 2021. Vol. 988. P. 164823. arXiv: 2007.00314 [physics.ins-det].
7. Aalseth C., Abdelhakim S., Chepurnov A. et al. Design and Construction of a New Detector to Measure Ultra-Low Radioactive-Isotope Contamination of Argon // *JINST*. 2020. Vol. 15, No 02. P02024. arXiv: 2001.08106 [astro-ph.IM].
8. Chepurnov A. S., Lukyanenko G. A., Novikova G. J. et al. Reactor Antineutrino Detector iDREAM // *Physics of Particles and Nuclei*. Russian Federation, 2017. Vol. 48, No 6. P. 981–983.
9. Chepurnov A. S., Gromov M. B., Shamarin A. F. Online calibration of neutrino liquid scintillator detectors above 10 MeV // *Journal of Physics: Conference Series*. United Kingdom, 2016. Vol. 675, No 1. P. 27.
10. Gribov I. V., Chepurnov A. S., Lukjanenko G. A. et al. iDREAM: an industrial detector for nuclear reactor monitoring // *Journal of Physics: Conference Series*. United Kingdom, 2016. Vol. 675, No 1. P. 012031.