

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук Цукермана Ильи Ильича на диссертацию Щедриной Татьяны Викторовны «Новые детекторные решения на основе ядерных фотоэмульсий в фундаментальных экспериментах по физике элементарных частиц и мюнографии объектов культурного наследия», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.2. – приборы и методы экспериментальной физики.

Диссертационная работа Т.В. Щедриной посвящена разработке и внедрению передовых методик в экспериментальной ядерной физике, основанных на применении современных эмульсионных детекторов, и их высокотехнологичной обработке с помощью автоматизированных сканирующих комплексов. **Цель** диссертационной работы – создание комплексных детекторных решений (физических и технологических) для регистрации релятивистских заряженных частиц в широком диапазоне фундаментальных и прикладных экспериментов ядерной физики. Для ее реализации были решены следующие **задачи**: восстановлено производство высококачественных российских ядерных фотоэмульсий; адаптировано программное обеспечение сканирующего комплекса ПАВИКОМ (ФИАН) для обработки и физического анализа данных экспериментов OPERA и SND@LHC; разработана и протестирована методика мюнографии крупных объектов на основе использования эмульсионных детекторов; проведены мюнографические исследования скрытой внутренней структуры объектов культурного наследия.

Решение проблемы восстановления производства ядерной фотоэмульсии требует разработки методик исследования, тестирования и оптимизации параметров, направленных на создание эффективных технологических процессов, обеспечивающих стабильное промышленное производство высококачественной продукции; создания автоматизированных оптических систем обработки эмульсионных данных, оптимизированных для фундаментальных исследований. Оно дает возможность реализации уникальных экспериментов по физике элементарных частиц, направленных на решение актуальных проблем физики двадцать первого века, например, поиск явлений Новой физики, что аргументирует **мотивацию** представленных в диссертации исследований и **актуальность** ее тематики.

Научная новизна исследования и практическая значимость работы состоит в том, что разработана комплексная методика микроскопического анализа и контроля качества современной ядерной фотоэмульсии, предложена и реализована серия уникальных экспериментов по изучению свойств российской ядерной фотоэмульсии, что позволило не только восстановить ее производство в России на уровне лучших мировых стандартов, но и обеспечить выход на международный рынок. Сканирование и физический анализ эмульсионных пленок, в том числе, автором на комплексе ПАВИКОМ, в рамках международного эксперимента OPERA позволили получить убедительные доказательства осцилляций нейтрино. Открытие осцилляций мюонных нейтрино в тау-нейтрино со статистической значимостью $6,1\sigma$ на основе наблюдения десяти ν_τ событий стало главным результатом эксперимента OPERA. В эксперименте SND@LHC, ЦЕРН для нейтринной мишени с ключевым участием автора разработана оптимальная конструкция гибридного детектора с применением эмульсионных технологий. В этом идущем в настоящее время эксперименте можно различать взаимодействия нейтрино всех трех ароматов при энергиях порядка ТэВ от протон-протонных взаимодействий Большого адронного коллайдера и детально исследовать процесс рождения очарованных частиц. Для реализации мюонографических экспериментов с использованием эмульсионных трековых детекторов разработана методология проведения экспериментов, выработаны оптимальные условия постановки экспериментов, алгоритмы обработки и интерпретации полученных результатов. Впервые в России выполнены мюонографические исследования скрытой внутренней структуры объектов культурного наследия.

Личный вклад автора в получении и анализе всех представленных в диссертации результатов является основополагающим на каждом этапе их получения.

Достоверность полученных в работе результатов была многократно подтверждена: при экспертных проверках качества российской эмульсии в ЦЕРНе и Университете Федерико II в Неаполе, при проверке данных, полученных на ПАВИКОМ путем их перекрестного сканирования в лабораториях Швейцарии и Италии, при публикации результатов фундаментальных исследований в высокорейтинговых журналах, при успешной реализации серии мюонографических экспериментов.

Результаты диссертации докладывались автором на международных и российских конференциях, международных совещаниях по эмульсионной методике в лаборатории физики высоких энергий Бернского университета, Швейцария, международных коллаборационных совещаниях экспериментов OPERA и SND@LHC, а также многочисленных семинарах в российских научных организациях.

Общая характеристика работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка использованной литературы.

Во **введении** приведено обоснование актуальности исследований, сформулирована цель работы, научная новизна работы, достоверность и практическая значимость, приведен личный вклад автора, основные положения, выносимые на защиту, список публикаций по теме диссертации, дан список конференций и семинаров, на которых состоялась апробация работы.

В **главе 1** описан процесс восстановления производства фотографической эмульсии в России. Дан краткий исторический обзор производства и использования ядерной фотоэмульсии (ЯФ), детально описана методология восстановления ЯФ российского производителя, комплекс реализованных разработок при непосредственном и определяющем вкладе автора работы, приведено подробное описание разработанной автором методики визуального и микроскопического контроля ЯФ.

Глава 2 посвящена фундаментальным исследованиям с использованием ЯФ на базе обработки данных на комплексе ПАВИКОМ. Приведено описание этого высокотехнологичного сканирующего комплекса, представлена информация об основных его компонентах и обзор результатов его применения в экспериментах OPERA и SND@LHC (краткое описание экспериментов, основные задачи, результаты сканирования и физического анализа событий).

Глава 3 посвящена детальному описанию методики мюнографических экспериментов на основе эмульсионных детекторов: представлены основные характеристики потоков атмосферных мюонов; подробно описана процедура реконструкции треков с использованием фотоэмульсии в качестве трекового детектора: используемое программное обеспечение, процедура распознавания изображений, реконструкция треков и оценка качества сканирования, приведены результаты

уникального эксперимента по оценке минимального количества фотоэмульсионных слоев в детекторе.

Глава 4 посвящена мюонографическим исследованиям крупных природных и промышленных объектов с использованием эмульсионных детекторов от апробации метода и первых тестовых экспериментов до полномасштабных натурных экспериментов по исследованию памятников культурного наследия России в крепости Нарын-Кала, Дербент, в Свято-Троицком Даниловом монастыре, Переславль-Залесский, в пещерном храме Свято-Успенского Псково-Печерского монастыря, Печоры. Проведённые эксперименты убедительно демонстрирует, что авторские технические решения и методы обработки и анализа данных для мюонографических работ на основе эмульсионных трековых детекторов позволяют исследовать внутренние особенности структуры объектов природного и искусственного происхождения, не разрушая их, что открывает новые возможности, в том числе, для изучения и сохранения памятников культурного наследия.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы.

Автореферат и публикации полностью соответствуют содержанию диссертации.

Диссертация Т.В. Щедриной представляет собой завершённое исследование. Автор детально и профессионально описывает исследовательский процесс от постановки проблемы до верификации итогов. Все защищаемые **положения получили полное отражение и обоснование**. Изложение работы логически хорошо выстроено, текст оптимально структурирован.

Имеется несколько несущественных **замечаний**:

1. Представление результатов: например, на стр. 120, Рис. 4.6 диссертации и на Рис. 8, стр. 25 автореферата было бы все же правильнее дать сравнение моделирования с экспериментом, используя одинаковые диапазоны по переменным t_x и t_y , иначе сравнивать на глаз довольно трудно.
2. Оформление диссертации и автореферата: к сожалению, отсутствуют номера страниц для некоторых публикаций в списках литературы; в подписях к рисункам нет ссылок на публикации, откуда они взяты; изредка, но встречаются англицизмы; не совсем корректно вставлен из соответствующей публикации

Рисунок 3.2 на стр. 88 в диссертации; названия элементарных частиц лучше давать курсивным шрифтом, также имеются несколько опечаток в текстах.

3. На мой взгляд, в диссертации все же маловато говорится о перспективах применения эмульсии и развития этой методики, в частности, в физике высоких энергий и в мюонографии объектов культурного наследия при том, что перспективы – неплохие.
4. Необходимо пояснить, почему при разборе детектора до проявки эмульсии хранятся в вертикальном положении.

Указанные замечания ни в коей мере не снижают общую оценку диссертационной работы Т.В. Щедриной и её значимость. Диссертационная работа представляет собой самостоятельное и законченное исследование на высоком научном уровне и удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 года, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а диссертант Т.В. Щедрина несомненно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.2. – приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук,
с.н.с. лаборатории нейтринной физики Курчатовского
комплекса теоретической и экспериментальной физики
НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва



Илья Ильич Цукерман

«15» 10 2025 г.

117218, г. Москва, ул. Большая Черемушkinsкая, 25;
Телефон: +7 4997896653, e-mail: Ilya.Tsoukerman@cern.ch

Подпись Ильи Ильича Цукермана заверяю
Заместитель директора-главный ученый секретарь
НИЦ «Курчатовский институт»



О.А. Алексеева

Список основных работ официального оппонента доктора физико-математических наук Цукермана Ильи Ильича по тематике диссертации Щедриной Татьяны Викторовны «Новые детекторные решения на основе ядерных фотоэмульсий в фундаментальных экспериментах по физике элементарных частиц и мюонографии объектов культурного наследия» в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. G. Aad... I. Tsukerman et al (ATLAS Collaboration), Search for new phenomena in pp collisions in final states with tau leptons, b-jets, and missing transverse momentum with the ATLAS detector, Phys.Rev.D 104 (2021) 112005.
2. G. Aad... I. Tsukerman et al (ATLAS Collaboration), Search for dark matter produced in association with a Higgs boson decaying to tau leptons at 13 TeV with the ATLAS detector, JHEP 09 (2023) 189.
3. G. Aad... I. Tsukerman et al (ATLAS Collaboration), Electroweak, QCD and flavour physics studies with ATLAS data from Run 2 of the LHC, Phys.Rept. 1116 (2025) 57.
4. G. Aad... I. Tsukerman et al (ATLAS Collaboration), Characterising the Higgs boson with ATLAS data from the LHC Run-2, Phys.Rept. 1116 (2025) 4.
5. G. Aad... I. Tsukerman et al (ATLAS Collaboration), Exploration at the high-energy frontier: ATLAS Run 2 searches investigating the exotic jungle beyond the Standard Model, , Phys.Rept. 1116 (2025) 301.
6. G. Aad... I. Tsukerman et al (ATLAS Collaboration), Electron and photon energy calibration with the ATLAS detector using LHC Run 2 data, JINST 19 (2024), P02009.
7. G. Aad... I. Tsukerman et al (ATLAS Collaboration), Muon reconstruction and identification efficiency in ATLAS using the full Run 2 pp collision data set at 13 TeV, Eur.Phys.J.C 81 (2021) 7.