

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук

Фахрутдинова Рината Макаримовича

на диссертационную работу

Мальцева Тимофея Владимировича

«Координатные детекторы высокого разрешения

на основе газовых электронных умножителей»,

представленную в диссертационный совет 24.1.162.02 на базе

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Института ядерной физики имени Г. И. Будкера

Сибирского отделения Российской академии наук

на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

по специальности 1.3.2 Приборы и методы экспериментальной физики

Актуальность работы:

Диссертационная работа Т.В. Мальцева посвящена изучению основных характеристик детекторов на основе газовых электронных умножителей (ГЭУ), а также численному моделированию работы внутреннего трекера детектора Супер Чарм-Тау Фабрики, представляющей собой проектируемый электрон-позитронный коллайдер.

В настоящее время в современных больших физических установках на ускорителях заряженных частиц широчайшее распространение имеют микроструктурные газовые детекторы. Среди них важнейшее место занимают детекторы на основе ГЭУ благодаря тому, что они способны обеспечивать пространственное разрешение лучше 50 мкм, временное разрешение на уровне 10 нс, эффективность регистрации не хуже 99%, и при этом содержат небольшое количество материала, обладают высокой радиационной стойкостью и загрузочной способностью порядка $10^7 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Достигнутые технологии производства позволяют создавать детекторы различной формы с площадью регистрирующей области в сотни квадратных метров. Среди примеров их активного применения можно упомянуть эксперименты CMS, ALICE, LHCb, TOTEM, COMPASS в ЦЕРНе, PHENIX на коллайдере RHIC в Брукхэйвенской национальной лаборатории (США), KLOE-2 в INFN (Италия). В этом ряду следует отметить также ИЯФ СО РАН, где детекторы на основе ГЭУ успешно используются в составе координатных систем установок ДЕИТРОН, Тестовый пучок электронов, Лазерный поляриметр.

Даже просто учитывая высокую востребованность детекторов на основе ГЭУ, дальнейшее изучение их характеристик является актуальной научной задачей. Если же

при этом решаются задачи, имеющие конкретные практические применения, то актуальность становится бесспорной. Одной из таких актуальных задач, поставленных и успешно решенных диссертантом, является выполненное им численное моделирование работы внутреннего трекера детектора будущей Супер Чарм-Тау Фабрики.

Новизна подхода и основные результаты:

Важную научную новизну представляет собой результат, полученный автором при исследовании с использованием средств численного моделирования процесса микроскопического движения электронов в газе в однородном электрическом поле и в присутствии ГЭУ. Обнаружен эффект сужения облака электронов ионизации в результате работы ГЭУ. В случае работы одного каскада ГЭУ сужение ширины электронного облака зависит от начальной координаты электрона ионизации и может достигать 30% по сравнению с однородным полем. Для тройного каскада ГЭУ наблюдается сужение облака электронов на 15% по сравнению с однородным полем, причём оно слабо зависит от начальной координаты электрона ионизации. Для каждого случая в моделировании посчитан коэффициент поперечной диффузии электронов в газе.

Установлены физические пределы пространственного разрешения детекторов на основе трёхкаскадных ГЭУ в моделировании и эксперименте, проведён анализ систематических погрешностей при измерении пространственного разрешения. В частности, обнаружено существенное влияние вклада многократного рассеяния регистрируемых частиц в изучаемом детекторе на стандартное отклонение распределения событий по координатной разности. Указаны методы подавления искажающего влияния взаимных поворотов детекторов на измеряемое пространственное разрешение. Применяя параметрическое моделирование, продемонстрирована возможность корректировки дифференциальной нелинейности метода центра тяжести, что позволяет улучшить пространственное разрешение до уровня 10 мкм. Найденные при моделировании функции для корректировки дифференциальной нелинейности были применены к экспериментальным данным и обнаружен ожидаемый эффект уменьшения наблюдаемого стандартного отклонения распределения событий по координатной разности.

Впервые проведено моделирование работы цилиндрического внутреннего трекера детектора проектируемой Супер Чарм-Тау Фабрики и вычислен минимальный

импульс заряженных пи-мезонов, при котором они могут быть реконструированы внутренним трекером.

Средствами моделирования исследовано искажение траектории электронов ионизации за счёт объёмного заряда ионов во внутреннем трекаре при использовании различных газовых смесей. Получен важный результат - наименьшие искажения траектории электронов ионизации, составляющие в максимуме 2 мм на 30 см дрейфа, имеют место для газовой смеси $\text{Ar}(45\%)-\text{iC}_4\text{H}_{10}(15\%)-\text{CF}_4(40\%)$ при внешнем электрическом поле напряжённостью 1 кВ/см, обратном ионном токе 1% и коэффициенте газового усиления торцевых детекторов 10^4 . Автором отмечено, что такие искажения сопоставимы с отклонениями дрейфующих электронов за счёт поперечной диффузии и поэтому они могут быть скомпенсированы при обработке данных.

Достоверность полученных результатов:

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений, поскольку в диссертационной работе дано вполне детальное описание процедуры моделирования исследуемых физических процессов и четко представлены детали постановки проведённых экспериментов. Результаты моделирования сравнивались с физическими оценками, а также известными экспериментальными данными для исследуемых процессов. При этом моделирование прохождения заряженных частиц через вещество проводилось в разных программах - GEANT4 и HEED. Эксперименты по изучению характеристик детекторов проводились в разных постановках, и важно, что полученные результаты находятся между собой в согласии.

Основные результаты диссертационной работы отражены в 6 научных статьях, опубликованных в международных журналах, входящих в перечень ВАК при Минобрнауки Российской Федерации. Представленные результаты докладывались и обсуждались на 10 международных конференциях.

Практическая значимость полученных автором результатов:

Коэффициент эффективной поперечной диффузии, полученный в микроскопическом моделировании движения электронов ионизации, может применяться для параметрического моделирования детекторов на основе ГЭУ при их дальнейшей разработке.

Установленные значения пространственного разрешения детекторов на основе трёхкаскадных ГЭУ позволяют корректно учитывать погрешности измеряемых величин в экспериментах, где эти детекторы применяются.

Нахождение порогового импульса для регистрации заряженных пи-мезонов внутренним трекером детектора будущей Супер Чарм-Тау Фабрики позволяет оценить экспериментальный потенциал для изучения распадов D-мезонов и других элементарных частиц на проектируемой установке.

Данного списка полезных достижений достаточно, чтобы уверенно констатировать высокую практическую значимость диссертации.

Содержание диссертации и ее завершенность:

Содержание диссертации соответствует заявленной теме диссертации и полностью отвечает поставленным целям и задачам исследования. Разбивка на главы вполне логична. Диссертация представляется законченным научным трудом, ее результаты являются, безусловно, новыми и обладают большой научной и практической значимостью. В частности, не вызывает сомнений, что результаты будут использованы в работах по программе Супер Чарм-Тау Фабрики.

Замечания и пожелания:

Каких-либо серьезных недостатков в диссертации мною не обнаружено. В качестве мелких замечаний я бы обратил внимание на следующее:

1. Из диссертации (гл.1.2.2) следует, что базовым рабочим газом для ГЭУ-детекторов установки ДЕЙТРОН является смесь $\text{Ar}(75\%)+\text{CO}_2(25\%)$. При обсуждении внутреннего трекера Супер Чарм-Тау Фабрики предполагается (гл.5.1) заполнение внутренних полостей слоев трехкаскадных ГЭУ тоже таким газом. И в гл. 4 этот же газ был заложен при моделировании для оценки пространственного разрешения отдельного детектора. Однако результаты моделирования процессов диффузии и усиления в ГЭУ-детекторе представлены не для 25%, а для 30% содержания CO_2 . Было бы логичнее показать результаты моделирования именно для 25% и, параллельно, осветить вопросы о влиянии изменения концентрации CO_2 и о критериях оптимизации.

2. Было бы целесообразно отметить какие требования предъявляются к чистоте газа, точности процентного содержания CO_2 , периодичности обновления/перезаполнения камер.
3. Для детекторов частиц, особенно предназначенных для работы в высокоинтенсивных пучках, важное значение имеют эффекты старения. Во введении к диссертации сказано, что детекторы на основе ГЭУ обладают высокой радиационной стойкостью и приведена ссылка ([8]) на публикацию 2001 г. зарубежных авторов. Полезно было бы отметить, изучались ли вопросы старения применительно к конкретным детекторам, которые рассматриваются в данной диссертации.

Данные замечания не снижают значимость рассматриваемой диссертационной работы, в целом выполненной на высоком уровне, и поэтому никак не влияют на ее безусловно положительную оценку.

Оценка автореферата диссертации:

Автореферат достаточно полно раскрывает основное содержание диссертации. Замечаний к автореферату нет.

Заключение оппонента по диссертации Т.В. Мальцева на соискание ученой степени кандидата наук:

Диссертация Мальцева Тимофея Владимировича «Координатные детекторы высокого разрешения на основе газовых электронных умножителей» является завершённой научно-квалификационной работой, в которой совокупность полученных результатов следует классифицировать как решение важных научных проблем, связанных с методикой регистрации элементарных частиц детекторами на основе газовых электронных умножителей и детекторами на основе время-проекционной камеры.

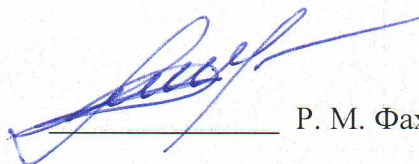
Диссертационная работа Т. В. Мальцева полностью соответствует требованиям и критериям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, установленным «Положением о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а её автор Мальцев Тимофей Владимирович

заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 Приборы и методы экспериментальной физики.

Я, Фахрутдинов Ринат Макаримович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Мальцева Тимофея Владимировича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент,
Фахрутдинов Ринат Макаримович,
Доктор физико-математических наук
Специальность 1.3.2 Приборы и методы экспериментальной физики
Адрес: 142281, Россия, Московская область, город Протвино,
площадь Науки, дом 1
Рабочий телефон: +7 (4967) 7 1-37-73
Адрес электронной почты: Rinat.Fakhrutdinov@ihep.ru
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
Ведущий научный сотрудник отделения экспериментальной физики

«20» мая 2026 г.



Р. М. Фахрутдинов

Подпись Фахрутдинова Рината Макаримовича
заверяю.

Учёный секретарь НИЦ
«Курчатовский институт» — ИФВЭ



Прокопенко Николай Николаевич