

## ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата физико-математических наук

**Гонгадзе Алекси**

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 им. Г.И. Будкера

Сибирского отделения Российской академии наук,

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

по специальности 1.3.2. «Приборы и методы экспериментальной физики»

### *Актуальность диссертационной работы*

Диссертация Мальцева Т.В. посвящена моделированию и экспериментальному исследованию координатных детекторов высокого разрешения на основе газовых электронных умножителей (ГЭУ), а также применению газовых микроструктурных технологий в составе внутренних трековых систем перспективных экспериментальных установок. Тема работы является актуальной для современной экспериментальной физики высоких энергий, поскольку требования к координатному разрешению, эффективности регистрации, устойчивости к высоким нагрузкам и малой радиационной длине материала трековых систем постоянно возрастают. Разработка и исследование подобных систем имеют большое значение как для действующих экспериментов, так и для перспективных установок следующего поколения.

Особое значение имеет то, что исследованные в работе детекторы непосредственно связаны с действующими и проектируемыми установками ИЯФ СО РАН на ускорительном комплексе ВЭПП-4: ДЕЙТРОН, Тестовый пучок электронов, КЕДР, КМД-3 и проект Супер Чарм-Тау Фабрики. Полученные результаты имеют методическое и прикладное значение для проектирования и эксплуатации координатных систем с микроструктурными газовыми детекторами.

### *Новизна подхода и основные результаты*

Диссертантом выполнен большой объём экспериментальных и вычислительных исследований, вследствие чего были получены следующие наиболее существенные результаты, обладающие научной новизной:

1. Экспериментально исследованы характеристики детекторов на основе трёхкаскадных ГЭУ, собранных в ИЯФ СО РАН для установки ДЕЙТРОН и Тестового пучка электронов. Показана стабильная работа в пропорциональном режиме при коэффициенте газового усиления до  $5 \times 10^4$  и эффективность регистрации на уровне около 99% при коэффициенте усиления выше  $2 \times 10^4$ ;

2. Выполнено моделирование процесса диффузии и усиления электронов в газе Ar(70%)-CO<sub>2</sub>(30%). Получен коэффициент эффективной поперечной диффузии для трёхкаскадного ГЭУ  $300 \pm 20$  мкм/ $\sqrt{\text{см}}$ , что позволяет использовать этот параметр в последующем параметрическом моделировании координатного разрешения;

3. Построена модель формирования зарядового кластера на считывающей структуре, исследовано влияние шага полосок, отношения сигнал/шум, порога регистрации, дифференциальной нелинейности метода центра тяжести и угла наклона трека на пространственное разрешение;

4. Экспериментально показано, что собственное пространственное разрешение детекторов на основе трёхкаскадных ГЭУ при регистрации ортогональных треков электронов находится на уровне 15-30 мкм;

5. Для внутреннего трекера Супер Чарм-Тау Фабрики выполнено сравнение вариантов на основе кремниевых слоёв, цилиндрических ГЭУ и время-проекционной камеры. Установлено, что минимальный импульс  $\pi$ -мезона для стабильной реконструкции трека в ТРС с тонкой внутренней стенкой составляет 55 МэВ/с;

6. Оценено влияние объёмного заряда положительных ионов в ТРС. Показано, что газовая смесь Ar(45%)-iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>(15%)-CF<sub>4</sub>(40%) даёт минимальные искажения траектории электронов ионизации - приблизительно 2 мм на 30 см дрейфа при обратном ионном токе 1%.

Полученные автором результаты являются полезными для разработки и эксплуатации газовых координатных систем высокого разрешения и для выбора технологического варианта внутреннего трекера будущих экспериментов.

### ***Достоверность и апробация полученных результатов***

Достоверность результатов и обоснованность выводов диссертационной работы не вызывает сомнения и обеспечивается:

- сочетанием экспериментальных измерений на тестовом пучке и в лабораторных условиях с численным моделированием в нескольких независимых и признанных в сообществе программных пакетах: GEANT4, HEED, Garfield++, ANSYS, DD4HEP, COMSOL и применением для анализа

экспериментальных данных средств статистической обработки на базе ROOT;

- многократными измерениями характеристик детекторов на установках ДЕЙТРОН и тестовом пучке электронов ВЭПП-4М в различных конфигурациях и режимах работы с хорошей воспроизводимостью;
- сопоставлением результатов моделирования с имеющимися в литературе экспериментальными данными по средним характеристикам детекторов на основе ГЭУ (коэффициенты усиления, диффузия, пространственное разрешение);
- обсуждением результатов на многочисленных российских и международных конференциях;
- публикациями результатов в ведущих научных высокорейтинговых журналах (в журналах из перечня ВАК при Минобрнауки России).

#### ***Практическая значимость полученных автором результатов***

Диссертация имеет выраженную практическую направленность. Уверен, что результаты диссертационной работы будут в дальнейшем востребованы при создании детектирующих систем для экспериментальных установок. Автором исследованы параметры, влияющие на пространственное разрешение, включая шаг считывающих полосок и отношение сигнал/шум. Полученные результаты позволяют оптимизировать конструкцию координатных детекторов для конкретных экспериментальных задач. Практически значимыми также являются результаты моделирования внутреннего трекера Супер Чарм–Тау Фабрики, включая оценку минимального импульса  $\pi$ -мезонов, допускающего реконструкцию трека, и анализ влияния объёмного заряда положительных ионов на искажения траекторий электронов ионизации.

#### ***Содержание диссертации и ее завершенность***

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа обладает внутренним единством, главы связаны между собой и подводят к общим выводам, которые хорошо согласуются с поставленными задачами. Назначение работы сформулировано чётко, а ее структура и содержание отражают цели и задачи исследования. Диссертация представляется законченным научным трудом с подробным теоретическим и экспериментальным исследованием основных характеристик координатных детекторов на основе ГЭУ, а также моделированием внутреннего трекера Супер Чарм–Тау Фабрики. Для достижения цели автором поставлен

ряд взаимосвязанных задач, включающих измерение эффективности и пространственного разрешения детекторов, моделирование диффузии электронов, исследование физических пределов пространственного разрешения, а также анализ работы время-проекционной камеры. Результаты, изложенные в диссертации, являются новыми и обладают высокой научной значимостью.

### *Замечания и пожелания*

Несмотря на высокий уровень работы, представляется целесообразным отметить некоторые моменты, которые, по моему мнению, необходимо учитывать в дальнейшем:

1. Заявление о стабильной работе детекторов при усилении до  $5 \times 10^4$  требует более подробной экспериментальной характеристики: времени набора данных, токов, частоты пробоев, условий газовой системы, скорости потока, влажности, загрузки и поведения после возможных разрядов. Без таких данных термин “стабильная работа” остаётся недостаточно количественным;
2. Коэффициент эффективной поперечной диффузии получен для газа Ar(70%)-CO<sub>2</sub>(30%) для конкретной конфигурации полей, тогда как экспериментальные детекторы, описанные в ряде разделов диссертационной работы, используют смесь Ar(75%)-CO<sub>2</sub>(25%) и иные напряжённости. Желательно было бы оценить чувствительность итогового пространственного разрешения при отличии состава газа, температуры, давления и электрических полей;
3. Вывод о “сужении” электронного облака трёхкаскадным ГЭУ является важным. Однако, по моему мнению, требуется более полное обсуждение влияния относительного расположения отверстий в каскадах, прозрачности ГЭУ и распределения лавинного усиления по каскадам. Эти факторы могут являться существенными при переносе результата на реальные детекторы;
4. Влияние относительных поворотов детекторов в работе оценивается как неустранимая систематическая погрешность порядка 1°. Для результата порядка десятков микрон желательно иметь независимое подтверждение геометрии: оптическую или механическую юстировку, контроль по нескольким независимым областям детектора, или демонстрацию устойчивости результата при изменении размера и положения анализируемой области;
5. Газовая смесь Ar(45%)-iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>(15%)-CF<sub>4</sub>(40%) даёт минимальные искажения в рассмотренной модели, однако недостаточно обсуждены эксплуатационные факторы: старение материалов и электродов в присутствии CF<sub>4</sub>, безопасность и горючесть изобутана, требования к газовой системе, скорость дрейфа, диффузия

в магнитном поле, стабильность усиления и совместимость с длительной работой крупного детектора.

Работа в целом написана хорошим и понятным научным языком, однако содержит ряд редакционных и орфографических недочётов (лишние запятые, опечатки и т.д.). Думаю, перечисление всех этих недочетов не имеет смысла. Ниже приведены некоторые из них:

1. В тексте используются разные написания одних и тех же обозначений: ТВФ2/ТВФ-2, ТРС/время-проекционная камера. Желательно унифицировать обозначения;
2. Формулировка “данные детекторы ... являются уникальными” (стр.5) требует либо пояснения, в чём состоит уникальность, либо более строгой научной формулировки;
3. В диссертации иногда встречаются повторение одинаковых конструкций и терминов в соседних абзацах, что стилистически перегружает текст.

#### ***Оценка автореферата диссертации***

Автореферат полностью раскрывает основные положения диссертации. Замечаний нет.

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

Отмеченные выше замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы Мальцева Тимофея Владимировича «Координатные детекторы высокого разрешения на основе газовых электронных умножителей» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2. «Приборы и методы экспериментальной физики». Диссертация представляет собой завершённое научно-квалификационное исследование, выполненное на высоком научном и методическом уровне. Полученные результаты обладают научной новизной, теоретической и практической значимостью.

Диссертационная работа Т.В. Мальцева «Координатные детекторы высокого разрешения на основе газовых электронных умножителей» полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-

математических наук по специальности 1.3.2. «Приборы и методы экспериментальной физики».

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

Официальный оппонент,

Гонгадзе Алекси

Кандидат физико-математических наук

Специальность 01.04.01 «Приборы и методы экспериментальной физики»,

адрес: 141980, Россия, г. Дубна, ул. Жолио Кюри, д. 20

тел: +7 (985) 260-77-13

эл. почта: gongadze@jinr.ru

Международная межправительственная научно-исследовательская организация  
Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ)

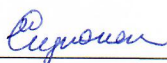
Начальник сектора №3 Научно-экспериментального отдела встречных пучков

Лабораторий ядерных проблем (ЛЯП) ОИЯИ

«28» мая 2026 г.

 А. Гонгадзе

Подпись А. Гонгадзе заверяю  
Ученый секретарь ЛЯП ОИЯИ

 И.В. Симоненко

