

ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертацию
Александрова Ивана Сергеевича «Разработка сверхчувствительного метода регистрации ионизации в детекторах на основе благородных газов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики**

Диссертационная работа И.С. Александрова посвящена разработке методов регистрации сцинтилляционного и электролюминесцентного излучений, лежащих в глубокой ультрафиолетовой области, в благородных газах с использованием микропиксельных лавинных фотодиодов. Работа в этом направлении чрезвычайно важна для экспериментов по поиску темной материи и поиску когерентного рассеяния реакторных антинейтрино на ядрах. В частности при взаимодействии легких слабоионизирующих частиц WIMP с массой несколько ГэВ с веществом детектора, ядра отдачи оставляют в детекторе энергию несколько кэВ, которую трудно регистрировать, и разработка методики надежной регистрации сигналов в кэВных областях является одним из важных направлений современных подземных низкофоновых экспериментов. Актуальность этих исследований, их новизна и научная значимость не вызывает сомнений.

Во введении диссертации дана краткая информация о темной материи и перечислены основные эксперименты в этой области. Также приводится информация об экспериментах, в которых осуществляется или планируется поиск процесса когерентного рассеяния нейтрино. Также описаны работы по использованию микропиксельных гейгеровских лавинных диодов в низкофоновых экспериментах с благородными газами. Несмотря на первые неудачные результаты, разработки в этом направлении ведутся интенсивно. Автор в качестве примера приводит эксперимент по поиску редких распадов мюонов MEG (Швейцария) и эксперимент NEXT (Испания) по поиску безнейтринного двойного бета распада Xe-136. Безусловно интересным является упомянутый автором метод регистрации инфракрасного излучения, возникающего при электролюминесценции, развиваемый в ИЯФ СО РАН. Сформулирована необходимость проведения исследований, положенных в основу диссертационной работы. В первой главе диссертации рассмотрены свойства ксенона как рабочего вещества детекторов для детектирования различных частиц. Выбор этого вещества определяется тем, что ксенон имеет наибольшее сечение взаимодействия для WIMP. Подробно описаны процессы сцинтилляции и ионизации в ксеноне и захват электронов электроотрицательными примесями. Важной характеристикой детектора является время жизни электрона до захвата примесью – оно должно быть достаточно большим для сохранения величины сигнала во время дрейфа. В этой главе также кратко рассмотрен процесс электролюминесценции.

Вторая глава посвящена описанию двухфазного эмиссионного детектора, изложен принцип работы этого детектора. Рассмотрено соотношение между сцинтилляционным и эмиссионным сигналами, обсуждается идентификация частиц и режекция фона в таких детекторах, объясняется причина использования в качестве фотоприемников сцинтилляционного сигнала лавинных фотодиодов вместо фотоумножителей. Приводится краткое описание принципов работы и основные параметры Гейгеровских микропиксельных лавинных фотодиодов. Рассмотрены принципы функционирования газовых электронных умножителей, особое внимание уделено ThGEM (толщина 0.22 мм, диаметр отверстий 0.4 мм, шаг 0.7 мм), который используется в данной работе. В главе 3 представлены предварительные тесты микропиксельных лавинных фотодиодов в жидком ксеноне. Основная проблема заключается в глубоком ультрафиолете 175 нм, который необходимо эффективно регистрировать. Идея заключается в использовании спектросместителя и последующей регистрации лавинными фотодиодами смещенных в область длинных волн фотонов. Для этого использовался р-терфенил, нанесенный на сапфировое стекло. Описана процедура испытания переизлучателя и представлены результаты измерений эффективности (PDE) регистрации излучения в жидком ксеноне с использованием спектросместителя. Получен очень интересный результат: величина PDE для сцинтилляционного света достигает 10%. Глава 4 посвящена изучению детектирующей системы ThGEM – спектросместитель – матрица лавинных микропиксельных Гейгеровских фотодиодов. Подробно изложена геометрия установки и электроника. Получен следующий результат: в среднем срабатывает 0.75 пикселя на один ионизационный электрон. Показано, что в случае увеличения геометрического фактора (суммарной активной площади фотосенсоров) и использования приборов КЕТЕК для одного электрона ожидается срабатывание около 50 пикселей лавинного фотодиода. Детально изучена позиционная чувствительность прибора. Этот параметр важен для подавления фоновых процессов при измерении когерентного рассеяния нейтрино. Автором получено пространственное разрешение около 1 мм для фотоумножителей и для матрицы микропиксельных лавинных фотодиодов.

Хотелось бы отметить наиболее интересные результаты, полученные автором диссертации. Оработана методика использования р-терфенила в качестве спектросместителя для глубокого ультрафиолета в жидком ксеноне. Получена очень многообещающий методический результат, обеспечивающий эффективность регистрации сцинтилляционного света из жидкого ксенона около 10%. Разработан и успешно протестирован метод защиты р-терфенила пленкой параполиксиленом, что позволяет предотвратить загрязнение жидкого ксенона. Создана детектирующая система из микропиксельных Гейгеровских лавинных фотодиодов, которая успешно запущена для работы с жидким ксеноном при низких температурах. Получены многообещающие параметры этой установки. Весьма перспективной является разработка системы с толстым газовым электронным усилителем, спектросместителем и микропиксельным лавинным фотодиодом. Получено пространственное разрешение установки около 1 мм, что также является хорошим методическим результатом. Пока чувствительность к ионизационному сигналу, полученная в этой работе, еще не очень высокая, но при использовании новых разработок фотоприемников ожидается существенно улучшить этот результат.

В диссертационной работе И.С.Александрова, однако, есть определенные недостатки. В работе довольно бегло описываются многие важные физические явления, принци-

пы детектирования, например, темной материи, параметры различных установок, имеющих близкую идеологию, но в то же время перечислению компаний, которые производят микропиксельные лавинные фотодиоды, отведена практически полная страница диссертации. В этом нет никакой необходимости. Описание принципов работы микропиксельный Гейгеровских диодов выглядит довольно хаотичным. На стр. 31-37, где рассматриваются эти приборы, автор не обсуждает такие важнейшие параметры, как cross-talk, темновой шум, послеимпульсы. При комнатной температуре эти факторы необходимо учитывать, хотя при низких температурах они безусловно в меньшей степени влияют на основные параметры установки. Такая информация была бы крайне полезна, тем более, что относительно небольшой объем диссертации позволял это сделать. Измерение сигнала матрицы лавинных диодов от электронов ионизации проводилась при пониженном рабочем напряжении ($\Delta V \sim 1$ В, стр. 73-74), т.е. при сниженной PDE. Остается неясной, почему измерения проводились при таком напряжении. При правильно подобранном напряжении смещения можно было бы ожидать в среднем срабатывания 3-х пикселей на один электрон ионизации, а не 0.75, полученных в этой работе.

В тексте диссертации встречаются неточности. Например, на стр. 28, где упоминается высвечивание сцинтилляционных фотонов и осциллограмма, ссылка сделана на рисунок 2.2б. Такого рисунка в диссертации нет и скорее всего эта ссылка относится к рисунку 2.1б. Встречаются небрежности в ссылках на публикации. Например, ссылка [51]. Во-первых, окончательный вариант МРРС, который был использован в Т2К, описан в других статьях. Во вторых, статья на которую имеется ссылка, опубликована в ПТЭ, а журнала «Общая экспериментальная техника» не существует. Вероятно, автор ошибочно заменил название журнала на название тематического раздела в этом журнале. На рисунке 3.10 длинная форма импульса соответствует сигналу с микропиксельного лавинного фотодиода, а короткая форма соответствует сигналу ФЭУ, а не наоборот, как это указано в диссертации. На стр. 60 обозначения на рисунке 4.1 и подпись к этому рисунку не соответствуют пояснениям к рисунку в тексте диссертации. Заключение диссертации следовало бы выделить как отдельный пункт, подводящий итог всей работы, а не обозначать параграфом 4.6, который является последним разделом главы 4.

Однако перечисленные выше недостатки никоим образом не могут изменить в целом положительного впечатления от работы и существенным образом повлиять на общую оценку диссертации, которая представляет собой законченное научное исследование, в котором получены интересные результаты. Качество работы, уровень и объем исследований оставляют хорошее впечатление. Актуальность исследования, новизна и важность полученных результатов очевидны. И.С.Александров продемонстрировал хорошее понимание исследуемой проблемы, владеет современной экспериментальной техникой, разработал программы моделирования установки и провел анализ полученных данных. Результаты, полученные диссертантом, вносят существенный вклад в развитие методики низкофоновых экспериментов, являются важной ступенью в создании детекторов для поиска частиц темной материи и поиска когерентного рассеяния нейтрино. Также следует отметить, что разработка этой методики важна для ускорительных нейтринных экспериментов с длинной базой следующего поколения, в которых планируется использовать детекторы на основе жидкого аргона. Безусловно результаты этой работы будут использоваться в лабораториях и группах, занимающихся низкофоновыми исследования с использованием детекторов

