

На правах рукописи



БОРИСОВА Екатерина Олеговна

**ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ПРОПОРЦИОНАЛЬНОЙ
ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В АРГОНЕ
ДЛЯ ДВУХФАЗНЫХ ДЕТЕКТОРОВ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ**

**01.04.01 — приборы и методы
экспериментальной физики**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

НОВОСИБИРСК — 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

БУЗУЛУЦКОВ
Алексей Федорович – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

БОЛОЗДЫНЯ
Александр Иванович – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, заведующий межкафедральной лабораторией экспериментальной ядерной физики.

БУДНЕВ
Николай Михайлович – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет», г. Иркутск, декан физического факультета.

ВЕДУЩАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Москва.

Защита состоится «6» февраля 2020 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук и на сайте <http://www.inp.nsk.su/obrazovanie/dissertatsionnye-sovety#%D0%B4-003-016-03>.

Автореферат разослан «17» декабря 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор. физ.-мат. наук

П.А. Багрянский

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В двухфазных детекторах темной материи на основе конденсированных благородных газов прямой поиск частиц темной материи (WIMP – Weakly Interacting Massive Particle) производится по наблюдению событий их предполагаемого упругого рассеяния на атомных ядрах в жидкой фазе детектора. При таком взаимодействии образуются ядра отдачи, которые, в свою очередь, генерируют сцинтилляционный и ионизационный сигналы, т. е. сигналы первичной сцинтилляции и первичной ионизации, называемые $S1$ и $S2$ соответственно. В свете последних положительных результатов по возможной регистрации легких WIMP (с массой порядка 10 ГэВ) в таких экспериментах, как DAMA/LIBRA, CoGeNT и CRESST и отрицательных результатов экспериментов LUX, XENON1T и PandaX наибольший интерес представляют малые энергии ядер отдачи — менее 7 кэВ. Сигнал первичных сцинтилляций от ядер отдачи с такими низкими энергиями может оказаться слишком мал для эффективной регистрации, поэтому требуется регистрировать первичную ионизацию. Основным способом регистрации первичной ионизации является процесс электролюминесценции в газовой фазе детектора, когда электроны первичной ионизации, вытянутые под действием электрического поля через границу раздела фаз, возбуждают атомы газа, что приводит к появлению излучения, которое может быть зарегистрировано при помощи существующих фотодетекторов.

Степень разработанности темы. Процесс электролюминесценции в Xe хорошо изучен как при комнатной температуре, так и в двухфазном режиме. Что касается Ar — другого используемого в детекторах темной материи благородного газа — к моменту настоящего исследования сложилась запутанная ситуация. Выход электролюминесценции в Ar при 87 К, измеренный группой WArP, был на порядок ниже, чем измеренный при комнатной температуре [1]. Кроме того, исследования пропорциональной электролюминесценции в двухфазном Ar , начатые в нашей лаборатории в 2014 году в рамках данной работы, еще больше запутали ситуацию: было наблюдеено наличие электролюминесценции вне области вакуумного ультрафиолета (ВУФ), а именно в видимой и ближней инфракрасной (ИК) области, а значит, и вне рамок стандартного механизма электролюминесценции [2]. Кроме того, до момента настоящих исследований, никакие другие данные относительно абсолютных выходов электролюминесценции в Ar при криогенных температурах не были представлены, так же как и для остальных благородных газов. Таким образом, актуальным было исследование эффекта электролюминесценции в Ar в двухфазном режиме.

До недавнего времени в детекторах для поиска темной материи и других редких процессов для регистрации сцинтилляций использовались ФЭУ. Однако, в последнее время намечается мировая тенденция к замене ФЭУ более компактными фотодетекторами, а именно Si-ФЭУ (кремниевыми фотоумножителями). Так, например, в проекте DarkSide-20k, который является продолжением единственного на данный момент в мире эксперимента по поиску темной материи на

основе двухфазного Ar , предложено использовать Si-ФЭУ для регистрации сцинтилляций. В эксперименте MEG II, который является апгрейдом эксперимента MEG по поиску процесса распада мюона в электрон и гамма-квант, нарушающего закон сохранения лептонного аромата, предложено использовать Si-ФЭУ вместо ФЭУ. Широкое возможное применение Si-ФЭУ связано с тем, что они имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными ФЭУ, включая более высокую эффективность регистрации фотонов, лучшую радиочистоту, компактный размер, более низкую стоимость, а также более широкий по сравнению с ФЭУ спектральный диапазон, вплоть до ближнего ИК.

Целью данной работы является изучение эффекта электролюминесценции в Ar в двухфазном режиме при помощи двухфазного криогенного детектора, разрабатываемого в лаборатории 3-3 ИЯФ СО РАН с 2011 года, с использованием различных типов фотодетекторов, включая Si-ФЭУ.

Таким образом, на момент начала данной работы важно было решить следующие **задачи**:

- Исследовать работу различных типов Si-ФЭУ при криогенных температурах с точки зрения устойчивости к перепадам температур, доступного усиления и уровня шумов, чтобы выбрать тип, наиболее подходящий для работы при криогенных температурах, в частности, в двухфазном криогенном детекторе на основе Ar .
- Исследовать характеристики выбранного типа Si-ФЭУ при криогенной температуре в том числе с точки зрения эффективности регистрации фотона.
- Разработать двухфазный криогенный детектор на основе Ar , электролюминесцентный зазор которого считывается при помощи различных типов фотодетекторов, а именно: ФЭУ со сместителем спектра, ФЭУ без сместителя спектра и Si-ФЭУ.
- Провести моделирование эффективности сбора фотонов на ФЭУ и Si-ФЭУ в двухфазном криогенном детекторе.
- Измерить выходы электролюминесценции в чистом Ar в двухфазном режиме в зависимости от приложенного поля в различных спектральных диапазонах.
- Объяснить наличие электролюминесценции ниже порога возбуждения и наличие компоненты электролюминесценции вне области ВУФ в чистом Ar .

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые систематически изучена работа Si-ФЭУ при криогенных температурах различных типов и производителей. Обнаружен эффект ухудшения производительности Si-ФЭУ при криогенных температурах, связанный с увеличением гасящего сопротивления Si-ФЭУ при понижении температуры.

2. Разработан двухфазный криогенный детектор с электролюминесцентным зазором — с одновременным считыванием электролюминесцентного зазора как с помощью ФЭУ, так и впервые с помощью Si-ФЭУ.
3. Впервые измерены выходы электролюминесценции в Ag в двухфазном режиме в зависимости от электрического поля. Обнаружено два эффекта, которые не были изучены ранее, а именно: электролюминесценция ниже порога возбуждения атомов аргона и наличие компоненты электролюминесценции в видимой области (вне ВУФ).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработан двухфазный криогенный детектор с электролюминесцентным зазором для изучения пропорциональной электролюминесценции в двухфазном Ag . Оптические сигналы с электролюминесцентного зазора считываются при помощи следующих типов фотодетекторов: Si-ФЭУ, ФЭУ со сместителем спектра и ФЭУ без сместителей спектра.
2. Изучена работа различных типов Si-ФЭУ при криогенных температурах. Обнаружен эффект ухудшения производительности Si-ФЭУ при криогенных температурах, связанный с увеличением гасящего сопротивления Si-ФЭУ при понижении температуры. В результате исследования был выбран тип Si-ФЭУ, наиболее подходящий для работы в двухфазных криогенных детекторах в Ag .
3. Проведено моделирование оптических свойств детектора, в том числе эффективности сбора фотонов на ФЭУ и Si-ФЭУ. Кроме того, измерена эффективность конверсии фотонов в сместителе спектра при облучении ВУФ фотонами.
4. Впервые систематически изучен эффект электролюминесценции в двухфазном режиме в чистом Ag при помощи двухфазного криогенного детектора. В частности, измерен абсолютный выход электролюминесценции в чистом Ag в зависимости от поля в разных спектральных диапазонах с использованием различных типов фотодетекторов.
5. Предложено возможное объяснение электролюминесценции ниже порога возбуждения Ag в рамках модели тормозного излучения электронов на нейтральных атомах

Личный вклад. Все основные результаты по теме исследования получены автором лично или при его непосредственном участии. Автор принимал участие в создании детектора, планировании, подготовке и проведении экспериментов, обработке и анализе экспериментальных данных, проведении расчётов и моделирования, подготовке публикаций.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на международных конференциях:

1. 13th Vienna Conference on Instrumentation (VCI2013), Vienna, Austria, 2013
2. Science of the future, Санкт-Петербург, Россия, 2014
3. 5th Young Researcher Workshop, Фраскати, Италия, 2016

4. Instrumentation for Colliding Beam Physics (INSTR17) Conference, Новосибирск, Россия, 2017
5. The 4th International Conference on Science, Application and Technology of Xenon Radiation Detector (XeSAT2018), Токио, Япония, 2018
6. 15th Vienna Conference on Instrumentation (VCI2019), Vienna, Austria, 2019

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения. Полный объем диссертации **140** страниц текста с **75** рисунками и **12** таблицами. Список литературы содержит **121** наименование.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, обсуждается степень разработанности темы, формулируется цель и ставятся задачи работы, излагается научная новизна представляемой работы.

В **первой главе** дан обзор принципов работы двухфазных детекторов темной материи, а так же описан механизм стандартной электролюминесценции в ВУФ и возможные механизмы электролюминесценции вне ВУФ. В двухфазных детекторах темной материи на основе конденсированных благородных газов поиск взаимодействия WIMP с веществом детектора осуществляется в жидкой фазе детектора. При таком взаимодействии образуются ядра отдачи, которые, в свою очередь, генерируют сигналы первичной сцинтилляции и первичной ионизации, называемые $S1$ и $S2$ соответственно. В традиционных двухфазных детекторах темной материи для регистрации ядер отдачи используются оба канала регистрации: и $S1$, и $S2$. На рисунке **1** представлен принцип работы такого детектора.

Сигналы $S1$ регистрируются нижней матрицей фотоумножителей (ФЭУ) или кремниевых фотоумножителей (Si-ФЭУ), расположенной в жидкой фазе детектора, либо верхней матрицей фотодетекторов (ФЭУ или Si-ФЭУ), расположенной в газовой фазе.

Сигналы $S2$ регистрируются следующим образом. Электроны первичной ионизации вытягиваются в газовую фазу детектора под действием электрического поля. В электролюминесцентном зазоре электроны производят так называемую пропорциональную электролюминесценцию. Электролюминесценция регистрируется при помощи верхней матрицы ФЭУ или Si-ФЭУ; нижняя матрица (при наличии) также регистрирует сигнал $S2$, но с меньшей эффективностью.

Механизм электролюминесценции может быть описан следующим образом. Электроны первичной ионизации между столкновениями с атомами газа ускоряются электрическим полем. Начиная с определенного значения электрического поля — порога электролюминесценции в ВУФ — электрон может

приобрести энергию, достаточную для возбуждения атома до первого возбужденного состояния ($3p^5 4s^1$). Возбужденные атомы в тройных столкновениях с атомами в основном состоянии образуют возбужденные молекулы — эксимеры. Эксимеры находятся в синглетном и триплетном состоянии и могут переходить в несвязанное основное состояние, излучая фотон в ВУФ.

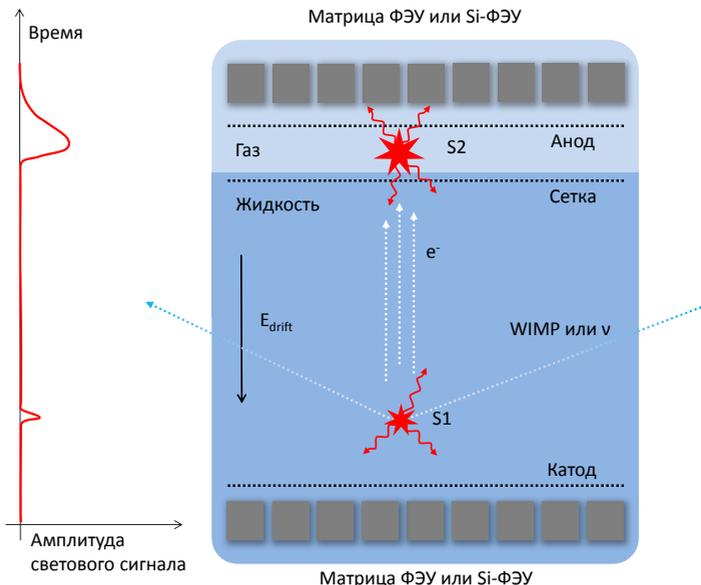


Рис. 1 — Принцип работы детектора темной материи

Стоит отметить, что, хотя многие авторы подтверждают пороговое поведение электролюминесценции для различных благородных газов, в некоторых работах (например, в [3]) встречаются указания на существование электролюминесценции при удельных полях ниже порогового значения.

При дальнейшем увеличении электрического поля энергия электрона может оказаться достаточной для возбуждения атомов благородного газа до более высоких уровней ($3p^5 4p^1$). Переходы с уровней $3p^5 4p^1$ на уровни $3p^5 4s^1$ приводят к излучению фотонов в ИК диапазоне. Измеренный при температуре 163 К порог электролюминесценции в Ar в ИК диапазоне (~ 7 Тд) оказался значительно выше порога электролюминесценции в ВУФ диапазоне (~ 4 Тд).

Другой возможный механизм, который приводит к появлению сцинтилляций вне ВУФ, возникает в присутствии примеси N_2 к газообразному Ar. В таком случае возможна передача возбуждения с атомов Ar на молекулы N_2 с последующим их девозбуждением через излучение в ближнем УФ. Этот механизм использовался, чтобы объяснить компоненту электролюминесценции вне ВУФ, наблюдаемую в газообразном Ar с небольшой (~ 50 ppm) примесью N_2 [2].

Однако, анализ уровней энергии, спектров излучения и констант скоростей реакций в двухфазном Ar с примесью N_2 , выполненный в [4], позволяет заключить, что гипотеза передачи возбуждения с атомов Ar на молекулы N_2 вряд ли может быть верна при такой малой концентрации N_2 .

В данной работе будет дана правильная интерпретация результатов работы [2] при помощи нового механизма электролюминесценции, а именно тормозного излучения электронов на нейтральных атомах.

Во **второй главе** разработана модель электролюминесценции за счет механизма тормозного излучения электронов на нейтральных атомах в рамках подхода, основанного на решении уравнений Больцмана для получения функций распределения энергии электронов. С помощью предложенной модели теоретически вычислены абсолютные выходы стандартной электролюминесценции и электролюминесценции за счет тормозного излучения, получены спектры тормозного излучения электронов на нейтральных атомах.

В 70-х годах прошлого века механизм тормозного излучения на нейтральных атомах использовался для объяснения пропорциональной электролюминесценции в ксеноне. Однако позже эта гипотеза была опровергнута. С тех пор тормозное излучение в связи с электролюминесценцией упоминалось только один раз как гипотеза, объясняющая слабую подпороговую электролюминесценцию, наблюдаемую в газообразном криптоне [3].

В настоящей работе показано, что, по крайней мере, для Ar необходим механизм тормозного излучения на нейтральных атомах для объяснения свойств пропорциональной электролюминесценции.

Тормозное излучение на нейтральных атомах производится медленными электронами, когда они рассеиваются (упруго или неупруго) на нейтральных атомах. Вклад в электролюминесценцию за счет тормозного излучения электронов на атомах в упругих столкновениях оказался практически на шесть порядков больше, чем вклад за счет неупругих столкновений, поэтому мы пренебрегаем последним.

Чтобы вычислить вклад в электролюминесценцию за счет тормозного излучения электронов на атомах, использовались энергетические функции распределения электронов, которые были рассчитаны путем решения уравнения Больцмана с использованием бесплатного программного обеспечения BOLSIG+. В качестве входных параметров использовались сечения рассеяния электронов, полученные в Magboltz.

Следует отметить, что подход, основанный на решении уравнения Больцмана, является довольно приблизительным. Действительно, функция распределения, полученные путем решения уравнения Больцмана, фактически усредняются за время между столкновениями. На самом деле должны использоваться энергетические функции распределения электронов непосредственно перед столкновениями, которые, очевидно, отличаются от полученных методом решения уравнений Больцмана, так как электроны ускоряются полем между столкновениями.

Мы попытались оценить влияние этой разности на выход электролюминесценции: функции распределения были скорректированы путем умножения их на степенную функцию таким образом, чтобы средние энергии для скорректированных распределений совпадали со средними энергиями непосредственно перед столкновениями.

На рисунке 2 показаны спектры удельного выхода электролюминесценции за счет тормозного излучения электронов на нейтральных атомах, в том числе с использованием функции распределения, скорректированной на среднюю энергию перед столкновением при 8.3 Тд (пунктирная линия).

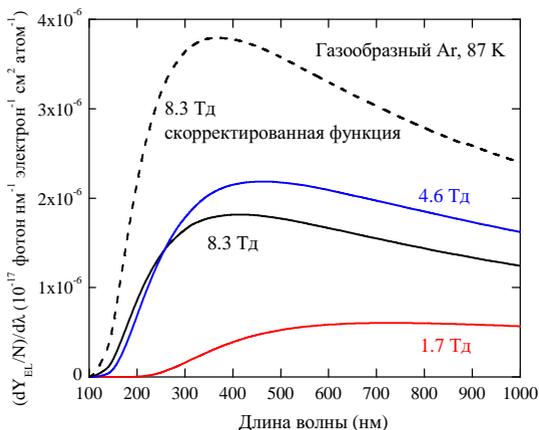


Рис. 2 — Спектры удельного выхода электролюминесценции за счет тормозного излучения в газообразном Ag при различных удельных электрических полях

На рисунке 3 сравнивается выход стандартной электролюминесценции с выходом тормозного излучения. Эффект скорректированных функций приводит к увеличению выхода электролюминесценции за счет тормозного излучения в 2 раза, что указывает на то, что неопределенность предсказаний теории, развитой здесь, не так мала. В пределах этой неопределенности, выход стандартной электролюминесценции, рассчитанный в этой работе, согласуется с микроскопическим подходом [5], что подтверждает правильность выбора энергетических функций распределения электронов.

Суммируя, теория тормозного излучения на нейтральных атомах предсказывает следующие свойства пропорциональной электролюминесценции в двухфазном Ag:

1. электролюминесценция ниже порога возбуждения Ag, в УФ, видимой и ИК-областях;
2. заметная компонента вне ВУФ выше порога возбуждения Ag, простирающаяся от УФ до ближнего ИК.

Далее мы увидим, насколько эти прогнозы теории подтверждаются в эксперименте.

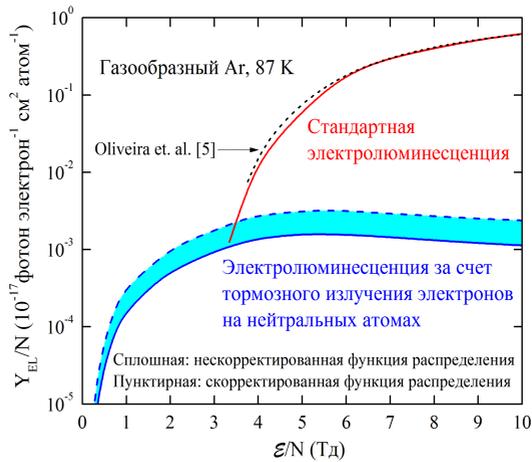


Рис. 3 — Удельный выход стандартной электролюминесценции и тормозного излучения на нейтральных атомах в газообразном Ar в зависимости от удельного электрического поля. Для сравнения показан выход стандартной электролюминесценции, рассчитанный в работе Oliveira et. al. [5]

Третья глава посвящена изучению работы различных типов Si-ФЭУ при криогенных температурах. Следует отметить, что, хотя работа Si-ФЭУ при криогенных температурах ранее изучалась, понимание этого вопроса до настоящей работы было недостаточно полное.

Чтобы обеспечить оптическое считывание сигнала электролюминесценции в двухфазном криогенном детекторе в Ar, разрабатываемом в настоящий момент в ИЯФ СО РАН им. Будкера и в НГУ, было предложено использовать Si-ФЭУ, работающие при 87 К. Соответственно, стояла задача найти такие Si-ФЭУ, которые могли бы эффективно работать при криогенных температурах, а именно иметь высокую эффективность регистрации фотонов в видимой и ближней ИК области, высокий коэффициент усиления и низкий уровень шумов.

На данный момент существует множество производителей кремниевых фотодиодов, по-разному называющих свой продукт. Мы остановили свой выбор на трех из них: MPPC (Multi-Pixel Photon Counters производства Hamamatsu, Япония), MRS APD (Metal Resistor Semiconductor APDs производства ЦПТА, Россия) и SiPM (Silicon Photo-Multipliers производства SensL, Ирландия). Таким образом, нами была изучена работа семи различных типов Si-ФЭУ (см. таблицу 1).

Для выбора подходящего типа Si-ФЭУ было проведено четыре измерительных цикла. Измерения проводились при помощи двухфазного криогенного детектора, который позднее был использован для изучения электролюминесценции.

В процессе изучения работы MRS APD 149-35 при криогенных температурах был обнаружен новый эффект, а именно ухудшение эффективности работы Si-ФЭУ при криогенных температурах при высоких нагрузках. Этот эффект

может налагать существенные ограничения на эффективность регистрации фотонов и скорость счета детекторов с оптическим считыванием на основе Si-ФЭУ. Было показано, что данный эффект связан с увеличением гасящего сопротивления Si-ФЭУ при понижении температуры.

Таблица 1 — Особенности конструкции исследованных типов Si-ФЭУ.

Тип Si-ФЭУ (производитель)	Тип корпуса	Площадь активной области, мм ²
MRS APD 150-50 (ЦПТА)	пластиковый	2.5×2.5
MRS APD 140-40 (ЦПТА)	пластиковый	3×3
MRS APD 149-35 (ЦПТА)	пластиковый	2.1×2.1
SiPM MicroSM-30035-X13 (SensL)	керамический	3×3
MPPC S10931-100P (Hamamatsu)	пластиковый	3×3
MPPC S10362-33-100C (Hamamatsu)	керамический	3×3
MPPC S13360-6050PE (Hamamatsu)	поверхностный тип монтажа	6×6

Зависимость эффективности работы Si-ФЭУ от загрузки исследовалась количественно с использованием алюминиевых фильтров для изменения потока рентгеновских фотонов: см. рисунок 4. Можно видеть, что средняя площадь импульса Si-ФЭУ существенно уменьшается (на 25%) при потоке рентгеновских фотонов 250 с^{-1} . Более монотонное уменьшение при более высоких потоках объясняется фактом, что большая часть амплитудного спектра теперь находится ниже порога регистрации; в результате средняя амплитуда остальных событий становится менее чувствительной к потоку фотонов.

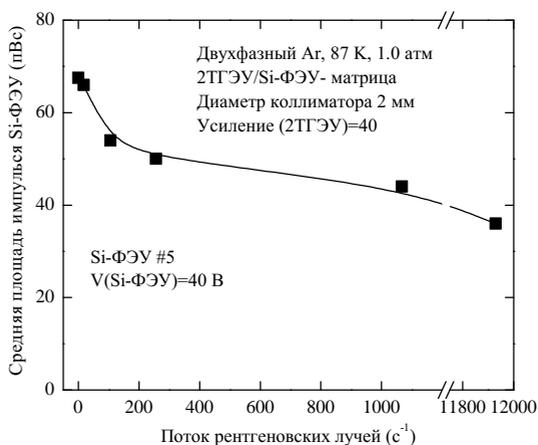


Рис. 4 — Средняя амплитуда сигнала Si-ФЭУ#5 в зависимости от потока рентгеновских фотонов

Из этой зависимости была оценена критическая скорость счета фотоэлектронов MRS APD 149-35, при которой его эффективность работы начинает ухудшаться; она составила $1 \times 10^4 \text{ c}^{-1}$ при 87 К.

MPPC S13360-6050PE производства Hamamatsu оказались наилучшими для работы при криогенных температурах как с точки зрения усилительных и шумовых характеристик (при максимальном усилении их скорость счета шумов составляет несколько Гц), так и с точки зрения более высокой эффективности регистрации фотонов в ближнем ИК и видимом диапазонах. Кроме того, гасящее сопротивление одного пикселя MPPC производства Hamamatsu при 87 К более, чем на четыре порядка, ниже гасящего сопротивления MRS APD 149-35, что решает проблему ухудшения характеристик при высоких потоках фотонов при криогенных температурах. Именно MPPC S13360-6050PE были выбраны нами для использования в двухфазном криогенном детекторе и изучения процесса пропорциональной электролюминесценции.

В четвертой главе приведено описание двухфазного криогенного детектора, при помощи которого выполнялись настоящие исследования. Для изучения электролюминесценции в двухфазном Ag в 2014 году был разработан и создан первый двухфазный криогенный детектор объемом 9 литров на основе Ag с электролюминесцентным зазором.

На рисунке 5 (слева) представлена фотография экспериментальной установки. Видна криогенная камера, импульсная рентгеновская трубка, расположенная у дна камеры, система питания и сбора данных, состоящая из электроники фирмы CAEN и осциллографа.

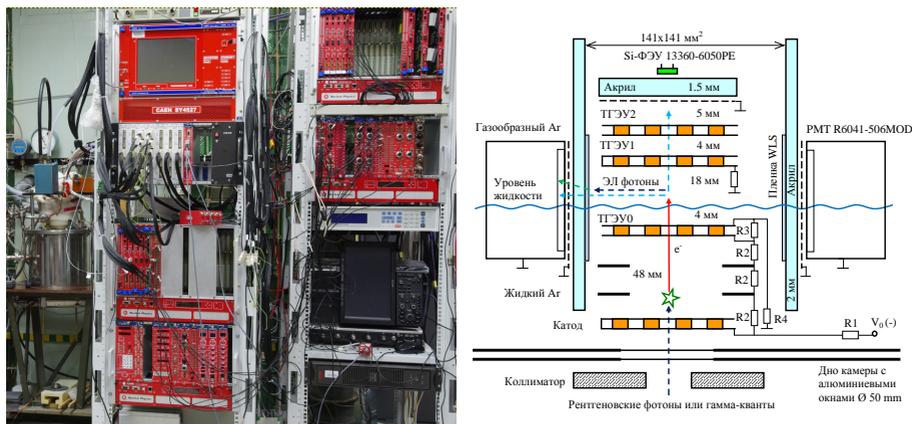


Рис. 5 — Слева: фотография экспериментальной установки. Справа: схема двухфазного криогенного детектора с электролюминесцентным зазором

Схема двухфазного криогенного детектора с электролюминесцентным зазором в первом цикле измерений показана на рисунке 5 (справа). В криогенной

камере располагался катод и электроды, формирующие поле в дрейфовом зазоре, погруженные в слой жидкого Ar (верхний полеформирующий электрод обозначен на рисунке как ТГЭУ0). На эти элементы подавалось напряжение через высоковольтный делитель, расположенный в жидкости. Таким образом, между катодом и ТГЭУ0 образовывалась дрейфовая область в жидком Ar. Слой жидкого Ar над ТГЭУ0 действовал как область электронной эмиссии. Электролюминесцентный зазор образовывался поверхностью жидкости и ТГЭУ1, который был заземлен через резистор и действовал как анод зазора. Все электроды имели одинаковую активную площадь $10 \times 10 \text{ см}^2$. Напряжение, прикладываемое к делителю, варьировалось таким образом, что электрическое поле в электролюминесцентном зазоре составляло $E_{GAr} = 1.44\text{-}7.2 \text{ кВ/см}$.

В первом цикле измерений (2015-2016 годы) были возможны два способа оптического считывания электролюминесцентного зазора. Во-первых, зазор просматривался четырьмя компактными криогенными 2-х дюймовыми ФЭУ (R6041-506MOD), расположенными по периметру зазора на расстоянии 77 мм от его центра. Перед каждым ФЭУ на внутренней поверхности акрилового короба были нанесены пленки сместителя спектра (WLS) на основе тетрафенилбутадиена в полистирольной матрице, чтобы преобразовать ВУФ в видимый свет. Во-вторых, сцинтилляции в спектральном диапазоне, отличном от ВУФ, т.е. в ближнем УФ, видимом и ближнем ИК диапазонах, регистрировались с использованием Si-ФЭУ MPPC 13360-6050PE, помещенного над ТГЭУ2.

При изучении электролюминесценции двухкаскадный ТГЭУ не работал в режиме усиления, и Si-ФЭУ не участвовали в оптическом считывании лавинных сцинтилляций. Вместо этого Si-ФЭУ непосредственно регистрировал пропорциональную электролюминесценцию с электролюминесцентного зазора через сборку двух ТГЭУ, которые действовали как теневая маска.

В 2017 году детектор был существенно модернизирован. Измерения, выполненные в 2017-2018 годах, будут называться вторым циклом измерений. Важной модификацией установки второго цикла было то, что один из четырех ФЭУ был намеренно оставлен нечувствительным к ВУФ. Вместо этого была обеспечена его чувствительность к УФ: вместо оргстекла с пленкой сместителя спектра перед данным ФЭУ располагалась оргстеклянная пластина, прозрачная выше 300 нм. Другая модификация заключалась в том, что использовался только один ТГЭУ перед Si-ФЭУ вместо двух. Кроме того, расстояние от ТГЭУ1 до Si-ФЭУ значительно сократилось: с 11 мм до 7 мм. Все это привело к значительному увеличению эффективности регистрации фотона на Si-ФЭУ.

В конце 2018 года детектор претерпел еще один этап модернизации. Измерения, выполненные в конце 2018 - начале 2019 года будут называться третьим циклом измерений. Важной модификацией установки по сравнению с предыдущей было то, что все четыре ФЭУ использовались без сместителя спектра, т.е. были нечувствительны к ВУФ, при этом использовался короб из акрила, прозрачного выше 300 нм.

Детектор работал в двухфазном режиме в равновесном состоянии при давлении насыщенного пара 1.000 ± 0.003 атм и при температуре 87.3 К. Для экспериментов использовался Ar с известной чистотой 99.9998% (сверхчистый, содержание $N_2 \leq 1$ ppm).

Контроль концентрации N_2 в Ar осуществлялся двумя способами, а именно при помощи анализатора остаточных газов (RGA Pfeiffer-Vacuum QMG220F₂) и методом эмиссионной спектроскопии с использованием газоанализатора «СВЕТ». Содержание N_2 в первом цикле измерений составляло около 9 и 24 ppm в жидкой и газовой фазах соответственно. Во втором и в третьем цикле измерений концентрация N_2 удерживалась менее 1 ppm.

Во время каждой процедуры охлаждения Ar очищался от электроотрицательных примесей фильтром Oxisorb, что обеспечивало время жизни электрона в жидкости $> 70 \mu s$.

Детектор облучался снаружи через алюминиевые окна в дне камеры и коллиматор с диаметром отверстия 6 мм рентгеновскими лучами от импульсной рентгеновской трубки со средней энергией фотонов 25 КэВ или гамма-квантами с энергией 88 КэВ от источника ^{109}Cd .

Пятая глава посвящена изучению процесса электролюминесценции в Ar при помощи двухфазного криогенного детектора. Для определения абсолютного выхода электролюминесценции необходимо знать в частности эффективность сбора фотонов на ФЭУ и Si-ФЭУ и эффективность конверсии фотонов в сместителе спектра. Эти параметры определялись при помощи моделирования методом Монте-Карло и в специальных измерениях.

В первом цикле измерений было подтверждено наличие компоненты вне ВУФ в Ar с небольшой (~ 9 ppm) примесью N_2 .

Во втором и третьем цикле измерений использовался чистый Ar (с концентрацией N_2 менее 1 ppm). На рисунке 6, слева показаны экспериментальные данные выхода электролюминесцентного зазора на один ФЭУ для конфигураций "ФЭУ с WLS" (измеренные во втором цикле измерений, квадраты) и "ФЭУ без WLS" (усредненные по второму и третьему циклу измерений, круги). Рисунок 6, справа, показывает усредненный по второму и третьему циклу измерений выход электролюминесцентного зазора для считывания при помощи конфигурации "Si-ФЭУ". Серые области показывают предсказания теории электролюминесценции за счет тормозного излучения на нейтральных атомах для конфигурации "ФЭУ без WLS" и "Si-ФЭУ" соответственно. Ошибки соответствуют квадратичной сумме систематических и статистических погрешностей.

Из рисунка 6 видно, что электролюминесценция в чистом Ar имеет два замечательных свойства. Во-первых, существует подпороговая электролюминесценция, ниже порога возбуждения Ar (около 4.0 Тд), где компонента вне ВУФ полностью доминирует. Во-вторых, имеется заметный вклад компоненты вне ВУФ выше порога.

Из рисунка 6 также видно, что компонента вне ВУФ хорошо описывается при помощи модели тормозного излучения при электрических полях ниже

4.0 Тд в пределах теоретической неопределенности. При более высоких полях теория быстро расходится с экспериментом. В работе описаны способы устранения данного расхождения и принята концепция, что все данные вне ВУФ в пропорциональной электролюминесценции являются данными, обусловленными механизмом тормозного излучения на нейтральных атомах.

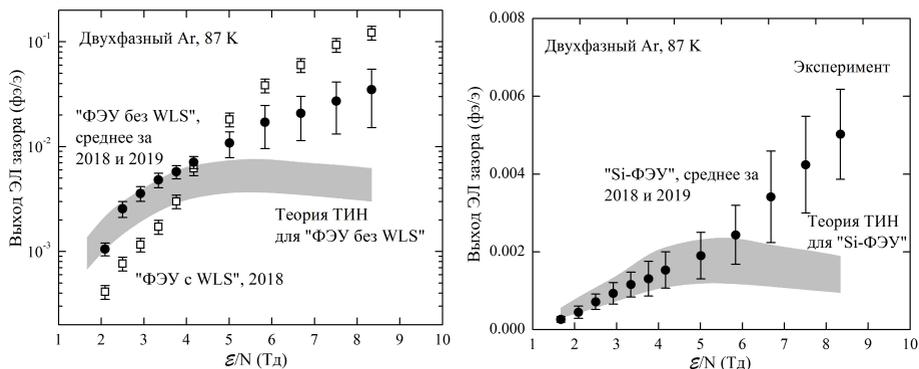


Рис. 6 — Выходы электролюминесцентного зазора для различных конфигураций детектора, полученные экспериментально и теоретически

В этой концепции из данных конфигурации "ФЭУ с WLS" была вычтена компонента электролюминесценции вне ВУФ, вычисленная с использованием данных конфигураций "ФЭУ без WLS" и "Si-ФЭУ". Таким образом был получен удельный выход стандартной электролюминесценции, который представлен на рисунке 7 по сравнению с выходами при комнатной температуре, полученными экспериментально [1] и теоретически [5]. Рисунок демонстрирует убедительное согласие между выходом стандартной электролюминесценции, определяемом здесь в двухфазном режиме, и рассчитанной теоретически с использованием микроскопического подхода [5].

На рисунке 8 представлены все известные экспериментальные данные об удельных выходах электролюминесценции в Ag для всех известных механизмов электролюминесценции: для электролюминесценции за счет тормозного излучения на нейтральных атомах (ТИН), измеренные в этой работе при 87 К (круги); для стандартной электролюминесценции в ВУФ, за счет возбужденных состояний Ag, измеренные в данной работе при 87 К (квадраты) и в [1] при комнатной температуре (треугольники); для электролюминесценции в ближней ИК области, проходящей через возбужденные состояния Ag, измеренные в [6] при 163 К (ромбы). Стоит отметить, что для стандартной электролюминесценции данные [1] превышают данные, полученные в настоящей работе при полях ниже 6 Тд. Было бы логично объяснить это расхождение вкладом тормозного излучения электронов на нейтральных атомах, который не был учтен в [1].

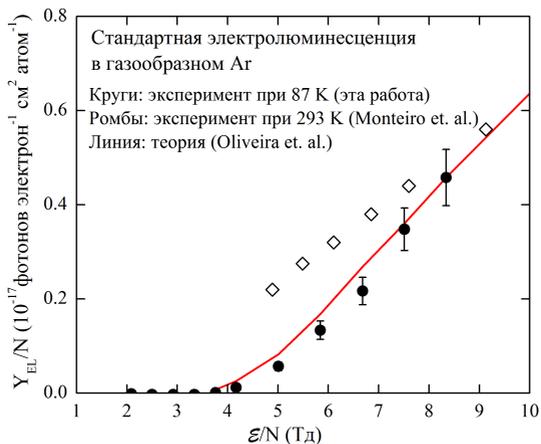


Рис. 7 — Выход стандартной (ВУФ) электролюминесценции в Ag в двухфазном режиме

Видно, что электролюминесценция за счет тормозного излучения на нейтральных атомах является самой слабой среди всех механизмов электролюминесценции. С другой стороны, она существует во всем диапазоне электрических полей, не имея порога, в отличие от стандартной электролюминесценции в ВУФ и электролюминесценции в ближнем ИК диапазоне.

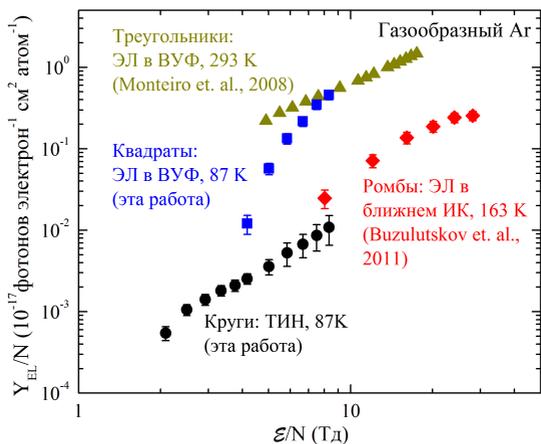


Рис. 8 — Сводка экспериментальных данных по удельному выходу электролюминесценции в аргоне для всех известных механизмов электролюминесценции

Важным выводом данной работы является то, что при умеренных электрических полях в электролюминесцентном зазоре, ниже 5 Тд, амплитуда сигнала S2 с ФЭУ без сместителя спектра может быть сравнима с амплитудой ФЭУ со

смещителем спектра в отсутствие оптического контакта между пленкой сместителя спектра и ФЭУ (см. рисунок 6, слева). Этот результат особенно важен для эксперимента по поиску темной материи DarkSide-50, где отклик на ФЭУ без сместителя спектра может быть почти таким же, как отклик ФЭУ со сместителем спектра при номинальном рабочем поле, равном 4.6 Тд.

Кроме того, наличие компоненты тормозного излучения в пропорциональной электролюминесценции может привести к тому, что форма импульса S2, в частности, в двухфазных детекторах темной материи на основе Ar, до настоящего времени анализировалась некорректно, что может повлиять на корректность определения величин с использованием быстрой компоненты, например, коэффициентов диффузии в жидком Ar или z-координат.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Изучены свойства семи различных типов Si-ФЭУ при криогенных температурах. Выбран оптимальный вариант для работы в двухфазных детекторах, а именно MPPC S13360-6050PE.
2. Разработан двухфазный криогенный детектор с электролюминесцентным зазором на основе Ar.
3. Разработана методика измерения эффективности конверсии фотонов в сместителе спектра при облучении ВУФ фотонами.
4. Измерен выход электролюминесценции в чистом Ar. Обнаружена компонента электролюминесценции в УФ, видимой и ИК области, в том числе ниже порога возбуждения Ar.
5. Экспериментально показано, что наблюдаемые эффекты не связаны с примесью N_2 .
6. Предложена интерпретация экспериментальных данных по пропорциональной электролюминесценции в рамках модели тормозного излучения дрейфующих электронов на нейтральных атомах, которое происходит одновременно со стандартной электролюминесценцией.
7. Использование данной модели позволило впервые определить выход стандартной электролюминесценции (в ВУФ) в газообразном Ar при криогенной температуре в двухфазном режиме.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 работ в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК:

1. Bondar A., ... Shemyakina E. et al. Performance degradation of Geiger-mode APDs at cryogenic temperatures // Journal of Instrumentation. — 2014. — Vol. 9. — P08006.
2. Bondar A., ... Shemyakina E. et al. MPPC versus MRS APD in two-phase Cryogenic Avalanche Detectors // Journal of Instrumentation. — 2015. — Vol. 10. — P04013.
3. Bondar A., ... Shemyakina E. et al. Proportional electroluminescence in two-phase argon and its relevance to rare-event experiments // Europhysics Letters. — 2015. — Vol. 112. — P.19001.

4. Бондарь А., ... Шемякина Е. и др. Исследование пропорциональной электролюминесценции в двухфазном Ar // Вестник НГУ. Серия: Физика. — 2017. — Vol. 12. — С. 5-15.
5. Bondar A., ... Shemyakina E. et al. Two-phase Cryogenic Avalanche Detector with electroluminescence gap operated in argon doped with nitrogen // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. — 2017. — Vol. A845. — P.206-209.
6. Bondar A., ... Shemyakina E. et al. Further studies of proportional electroluminescence in two-phase argon // Journal of Instrumentation. — 2017. — Vol. 12. — C05016.
7. Buzulutskov A., ... Shemyakina E. et al. Revealing neutral bremsstrahlung in two-phase argon electroluminescence // Astroparticle Physics. — 2018. — Vol. 103. — P. 29-40.

А так же получено два свидетельства на интеллектуальную собственность:

1. Соколов, А. и Шемякина, Е. Система сбора данных с матрицы гейгеровских лавинных фотодиодов // Свидетельство о регистрации ноу-хау №15. — Дата регистрации 27.12.2012.
2. Соколов, А. и Шемякина, Е. Система сбора данных с матрицы гейгеровских лавинных фотодиодов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013615653. — Дата регистрации 17.06.2013.

Список литературы

1. Monteiro C., et al. Secondary scintillation yield in pure argon // Physics Letters B. — 2008. — Vol. 668, no. 3. — P. 167–170.
2. Bondar A., ... Shemyakina E., et al. Proportional electroluminescence in two-phase argon and its relevance to rare-event experiments // Europhysics Letters. — 2015. — Vol. 112, no. 1. — P. 19001.
3. Барабаш А., Болздыня А. Жидкостные ионизационные детекторы. — Москва : Энергоатомиздат, 1993. — 239 с.
4. Buzulutskov A. Photon emission and atomic collision processes in two-phase argon doped with xenon and nitrogen // EPL (Europhysics Letters). — 2017. — Vol. 117, no. 3. — P. 39002.
5. Oliveira C., et al. A simulation toolkit for electroluminescence assessment in rare event experiments // Phys. Lett. — 2011. — Vol. B703. — P. 217–222.
6. Buzulutskov A., et al. Infrared scintillation yield in gaseous and liquid argon // EPL (Europhysics Letters). — 2011. — Vol. 94, no. 5. — P. 52001.

БОРИСОВА Екатерина Олеговна

**Изучение эффекта пропорциональной
электролюминесценции в аргоне
для двухфазных детекторов темной материи**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 09.10.2019 г.
Подписано в печать 10.10.2019 г.
Формат бумаги 100 × 90 1/16 Объем 1.1 печ.л., 0.9 уч.-изд.л
Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 8

Обработано на РС и отпечатано
на ротапинтере ИЯФ СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11