

На правах рукописи



Олейников Владислав Петрович

**Исследование электролюминесценции и первичных
сцинтилляций в видимом диапазоне в детекторах
на основе жидкого аргона**

1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

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

НАУЧНЫЙ
РУКОВОДИТЕЛЬ

—

доктор физико-математических наук
Бузулуцков Алексей Федорович

доктор физико-математических наук,
академик РАН Бондарь Александр Евгеньевич

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Болоздыня

Александр Иванович

—

доктор физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», заведующий лабораторией

Буднев

Николай Михайлович

—

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет», декан

ВЕДУЩАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ

—

Международная межправительственная научно-исследовательская организация
Объединенный институт ядерных исследований

Защита диссертации состоится «11» марта 2025 г. в 16:30 на заседании диссертационного совета 24.1.162.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 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 <https://inp.nsk.su/obrazovanie/dissertatsionnye-sovety#24-1-162-02>.

Автореферат разослан 22 января 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук, профессор РАН



Лотов Константин
Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Многочисленные астрономические наблюдения указывают на наличие во Вселенной темной материи, которая не участвует в электромагнитном взаимодействии и проявляет себя только в гравитационном взаимодействии. Одним из вероятных кандидатов на роль частиц темной материи является слабо взаимодействующая массивная частица (Weakly Interacting Massive Particle, WIMP). Значительный прогресс был достигнут в развитии методов прямой регистрации WIMP, основанных на наблюдении событий от предполагаемого упругого рассеяния WIMP на атомных ядрах вещества детектора. В эксперименте DAMA/LIBRA получены первые указания на наблюдение WIMP, однако множество последующих экспериментов не подтвердили эти результаты.

Одним из возможных путей дальнейшего прогресса в поиске темной материи является увеличение массы рабочего вещества детектора. Среди множества типов детекторов особенно выделяются двухфазные (жидкость-газ) детекторы на основе аргона или ксенона, поскольку на них были получены самые низкие пределы на сечение рассеяния WIMP. Кроме того, двухфазные детекторы могут быть относительно просто масштабированы. Например, недавно были созданы детекторы на основе ксенона PandaX-4T, LZ и XENONnt, где масса рабочего вещества была увеличена в несколько раз относительно предыдущих версий детекторов и составила порядка 5 тонн. Однако в отличие от двухфазных детекторов на основе ксенона, детекторы на основе аргона более чувствительны к регистрации WIMP с малой массой и их возможности по масштабированию гораздо шире. Так, например, сейчас активно ведутся работы по созданию детектора DarkSide-20k с массой аргона 20 тонн. В случае успешной реализации этого проекта планируется создание детектора ARGO с массой аргона 300 тонн, который позволит достичь предельной чувствительности в широком диапазоне масс WIMP для детекторов ядер отдачи. Таким образом, двухфазные детекторы на основе аргона являются одними из самых перспективных детекторов для поиска темной материи.

В двухфазных детекторах регистрируются первичные сцинтилляции и первичная ионизация, вызванная взаимодействием ионизирующих частиц с жидкой фазой рабочего вещества детектора. Первичная ионизация при этом регистрируется при помощи эффекта электролюминесценции в газе, вызванного электронами, эмитированными из жидкой фазы и дрейфующими в газовой фазе под действием электрического поля. Доминирующим механизмом образования как первичных сцинтилляций, так и электролюминесцентного сигнала является механизм распада эксимеров, в результате чего проходит излучение в вакуумном ультрафиолете (ВУФ). В аргоне такое излучение идет с длиной волны 128 нм и зарегистрировать его

напрямую довольно проблематично, поскольку квантовая эффективность фотодетекторов близка к нулю в этом диапазоне.

Классическим решением проблемы регистрации света является использование сместителей спектра, переизлучающих 128 нм в видимый диапазон, где расположен пик квантовой эффективности фотодетекторов. Самым распространенным сместителем спектра, используемым в двухфазных детекторах на основе аргона, является 1,1,4,4-тетрафенил-1,3-бутадиен (ТФБ). Хотя ТФБ обладает высокой эффективностью переизлучения относительно других сместителей спектра, он может приводить к нестабильности светосбора на больших временных масштабах, в частности, из-за его растворения в жидком аргоне и отслаивания от подложки в криогенных условиях. Также для достижения высокой эффективности переизлучения ТФБ его напыляют на поверхности в условиях низкого (около 10^{-5} мбар) давления, что вызывает проблемы при создании масштабных детекторов. Другая известная проблема связана с трудностями в достижении однородного уровня нанесения сместителя спектра на большую площадь детектора.

Однако использование сместителей спектра не является обязательным, поскольку помимо доминирующего механизма излучения в вакуумном ультрафиолете существуют и другие механизмы с излучением в видимом и инфракрасном диапазоне, что позволяет регистрировать излучение напрямую. Также регистрация света напрямую позволила бы решить проблему с относительно небольшой длиной поглощения вакуумного ультрафиолета (около метра) в жидком аргоне при наличии малых концентраций примесей, которая будет препятствовать регистрации первичных сцинтилляций в масштабных детекторах на основе аргона.

Степень разработанности темы исследования

Для электролюминесцентного сигнала в газообразном аргоне ранее уже наблюдали излучение вне вакуумного ультрафиолета, вызванное механизмом атомарной электролюминесценции или механизмом тормозного излучения на нейтральных атомах (эффект ТИН). Значительно меньше известно про излучение в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах в жидком аргоне: в одних работах наблюдали такое излучение, а в других утверждали о его отсутствии.

Также стоит отметить, что в настоящее время почти отсутствуют данные по световыходу первичных сцинтилляций в видимом диапазоне в аргон-метановой смеси, которая может быть использована в качестве рабочего вещества нейтронного вето-детектора, являющегося неотъемлемой частью детекторов темной материи. Использование аргон-метановой смеси в нейтронных вето-детекторах позволило бы отказаться от пожароопасных жидких углеводородов, что особенно актуально по причинам безопасности при создании масштабных детекторов.

Таким образом, исследование электролюминесценции и первичных сцинтилляций в видимом диапазоне в детекторах на основе жидкого аргона может помочь в создании масштабных двухфазных криогенных детекторов на основе аргона для дальнейшего прогресса в изучении темной материи.

Цели и задачи

Целью данной работы является исследование электролюминесценции и первичных сцинтилляций в видимом диапазоне при помощи криогенного двухфазного детектора на основе аргона, разрабатываемого в лаборатории 3-3 ИЯФ СО РАН с 2011 года.

Было необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать двухфазный криогенный детектор на основе аргона, позволяющий зарегистрировать электролюминесценцию при помощи альтернативной схемы считывания в видимом диапазоне.
2. Исследовать световой выход электролюминесценции двухфазного криогенного детектора в зависимости от приложенного электрического поля, оценить пространственное разрешение детектора и энергетический порог регистрации частиц.
3. Оценить возможность практического применения детекторов с альтернативной схемой считывания.
4. Разработать двухфазный криогенный детектор для регистрации первичных сцинтилляций в видимом диапазоне.
5. Исследовать временные характеристики и абсолютный световой выход первичных сцинтилляций в видимом диапазоне в зависимости от типа ионизирующего излучения, приложенного электрического поля и содержания примеси метана в жидком аргоне при помощи разных типов фотодетекторов.
6. Оценить возможность практического применения детекторов с регистрацией первичных сцинтилляций в видимом диапазоне.

Научная новизна

1. Впервые продемонстрирована успешная работа практического двухфазного детектора в аргоне с прямым считыванием на КФЭУ-матрицу в видимом диапазоне. Кроме того, это является первым практическим применением эффекта тормозного излучения на нейтральных атомах в детекторах частиц.
2. Впервые систематически изучены первичные сцинтилляции и измерен абсолютный световой выход в видимом диапазоне в жидком аргоне и его смесях с метаном для альфа-частиц и рентгеновского излучения.

Теоретическая и практическая значимость работы

Полученные результаты исследований указывают, что световой выход электролюминесценции и первичных сцинтилляций в видимом диапазоне в чистом аргоне довольно низкий, однако возможно создание двухфазных аргоновых детекторов для регистрации WIMP. При прямом считывании на матрицу кремниевых фотоэлектронных умножителей (КФЭУ-матрицу) возможен поиск WIMP с массой более $10 \text{ ГэВ}/c^2$, а при считывании на умножитель на основе толстого газового электронного умножителя с КФЭУ-матрицей (умножитель ТГЭУ/КФЭУ-матрица) возможен поиск WIMP с массой до нескольких $\text{ГэВ}/c^2$. Также рассмотренные схемы считывания могут найти практическое применение при разработке детекторов, регистрирующих редкие события с большим энерговыделением, например, детекторов гамма-квантов, нейтрино/антинейтрино.

Систематическое изучение свойств первичных сцинтилляций в видимом диапазоне в чистом жидком аргоне и его смесях с метаном является существенным вкладом в физику сцинтилляций благородных газов.

Методология и методы исследования

Методологической основой диссертационного исследования являются прямые измерения на прототипе двухфазного детектора темной материи, а также методы статистической обработки данных при помощи программы ROOT CERN и моделирования методом Монте-Карло в программе Geant4.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Двухфазный детектор на основе аргона с новой (альтернативной) схемой считывания электролюминесцентного сигнала в видимом и инфракрасном диапазоне позволяет достичь порогов регистрации 6 кэВ_{nr} и 2 кэВ_{nr} при прямом считывании на КФЭУ-матрицу и считывании на умножитель ТГЭУ/КФЭУ-матрица, соответственно, что достаточно для поиска WIMP с массой выше нескольких $\text{ГэВ}/c^2$.
2. Абсолютный световой выход первичных сцинтилляций в видимом диапазоне в жидком аргоне составляет 200 фотон/МэВ для рентгеновского излучения и 92 фотон/МэВ для альфа-частиц. Систематическое изучение первичных сцинтилляций в видимом диапазоне указывает на механизм возникновения излучения, отличный от эксимерного.
3. При добавлении метана в жидкий аргон значительно снижается световой выход первичных сцинтилляций в видимом диапазоне, однако при высоком содержании метана (свыше 1%) заметна тенденция выхода на плато. При содержании метана в 1% абсолютный световой выход первичных сцинтилляций в видимом диапазоне

составляет 13 фотон/МэВ для рентгеновского излучения и 1.8 фотон/МэВ для альфа-частиц.

Степень достоверности и апробация результатов

Апробация работы. Результаты работы докладывались на курсах молодых ученых и семинарах в ИЯФ СО РАН, на собраниях коллаборации DarkSide, а также представлялись на международных конференциях:

1. Moscow International School of Physics, Москва, Россия, 2019.
2. Instrumentation for Colliding Beam Physics (INSTR20) Conference, Новосибирск, Россия, 2020.
3. Asian Forum for Accelerators and Detectors (AFAD), Синьчжу, Тайвань, 2024.

Личный вклад автора

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, написании программного обеспечения для системы сбора данных, обработке и анализе экспериментальных данных с использованием собственных программ на языке C++ и программы ROOT CERN, проведении расчетов и моделирования в программе Geant4, подготовке публикаций. Список публикаций, рекомендованных ВАК, приведенный в конце автореферата, содержит 5 работ. Вклад соискателя в опубликованные работы по теме диссертации является определяющим.

Авторский вклад соискателя в статье [1] заключается в наборе и анализе данных, полученных при регистрации гамма-излучения от источника ^{109}Cd тремя различными типами детекторов. Автор показал, что в спектре излучения источника ^{109}Cd присутствует характеристическое излучение вольфрама, которое вызывает значительное уширение энергетического спектра при регистрации излучения при помощи двухфазного детектора с низким энергетическим разрешением.

Авторский вклад соискателя в статье [2] заключается в оценке влияния тормозного излучения нейтральных атомов в электролюминесцентном сигнале на характеристики детектора DarkSide-50. В частности, показано, что при низких электрических полях вблизи порога эксимерной электролюминесценции тормозное излучение нейтральных атомов может давать значительный вклад в быструю компоненту сигнала.

Авторский вклад соискателя в статье [3] заключается в подготовке и проведении эксперимента, наборе и анализе данных, полученных с однофазного криогенного детектора. Автор показал, что добавка метана в жидкий аргон приводит к значительному снижению световыхода первичных сцинтилляций в видимом и инфракрасном диапазоне.

Авторский вклад соискателя в статье [4] заключается в подготовке и проведении эксперимента, наборе и анализе данных, полученных с двухфазного криогенного детектора на основе аргона, где использовалась альтернативная схема считывания электролюминесцентного сигнала в видимом и инфракрасном диапазоне. Автор показал, что даже при использовании альтернативной схемы считывания, которая обеспечивает низкий световыход, можно найти практическое применение детекторов такого типа в регистрации WIMP с массой более $10 \text{ ГэВ}/c^2$.

Авторский вклад соискателя в статье [5] заключается в подготовке и проведении эксперимента, наборе и анализе данных, полученных с криогенного детектора, работающего в однофазном или двухфазном режиме. Автор исследовал свойства первичных сцинтилляций в чистом аргоне и его смесях с метаном в видимом и инфракрасном диапазоне. В частности, впервые был измерен абсолютный световыход для рентгеновского излучения со средней энергией 25 кэВ и альфа-частиц с энергией 5.5 МэВ .

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 132 страницы, включая 53 рисунка и 7 таблиц. Список литературы содержит 180 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава диссертации начинается с косвенных доказательств существования темной материи, описания принципов её регистрации и многообразия детекторов для прямой регистрации WIMP. Приведены последние данные по прямому поиску WIMP. Показано, что одним из возможных путей дальнейшего прогресса в поиске темной материи является увеличение массы рабочего вещества детектора, причем двухфазные детекторы на основе аргона являются наиболее перспективными для решения данной задачи.

Рассмотрено устройство классических двухфазных детекторов темной материи на основе аргона (см. рисунок 1). Двухфазный детектор содержит жидкую и газовую фазу. При прохождении частицы через двухфазный детектор рассеяние преимущественно происходит в жидкой фазе. Если регистрируемая частица взаимодействует с атомом вещества детектора через его электронную оболочку, что характерно для фотонов,

электронов, альфа-частиц и т.д., то говорят о регистрации электронов отдачи и обозначают энергосвечение индексом “ ee ”. Если регистрируемая частица взаимодействует с атомом вещества детектора через его ядро, что характерно для нейтронов и WIMP, то говорят о регистрации ядер отдачи и обозначают энергосвечение индексом “ nr ”.

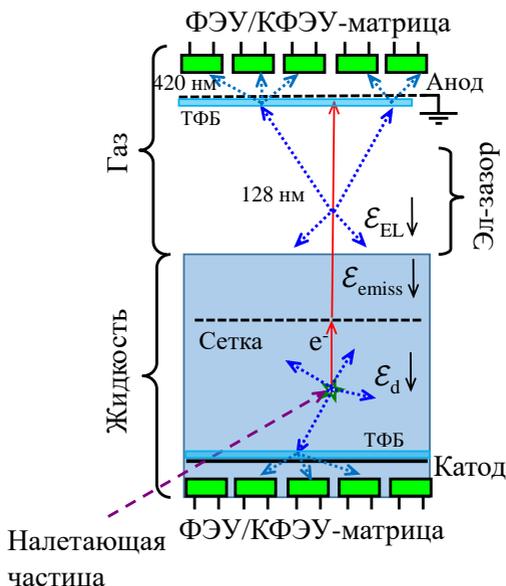


Рисунок 1 — Эксимерная (классическая) схема считывания двухфазных аргонных детекторов с ЭЛ-зазором на ФЭУ/КФЭУ-матрице. ϵ_d , ϵ_{emiss} и ϵ_{EL} — электрические поля в дрейфовом, эмиссионном и электролюминесцентном промежутках соответственно

Световой сигнал, возникающий в области взаимодействия налетающей частицы с веществом детектора, называют сигналом $S1$ или первичными сцинтилляциями. Доминирующим механизмом первичных сцинтилляций в аргоне является эксимерный механизм с излучением вакуумного ультрафиолета на длине волны 128 нм. При использовании только сигнала $S1$ можно добиться порога регистрации в несколько десятков $kэВ_{nr}$.

При приложении электрического поля к объему детектора часть электронов в электрон-ионных парах может избежать рекомбинации и попасть в газовую фазу, где при столкновении электронов с атомами газа при достаточно высоком электрическом поле возникает возбуждение и последующее высвечивание атомов или молекул аргона за счет эффекта электролюминесценции; такой тип сигнала называется сигналом $S2$

или электролюминесцентным сигналом. Доминирующим механизмом возникновения сигнала S2, как и сигнала S1, является механизм распада эксимеров с излучением на длине волны 128 нм. Используя сигнал S2, энергетический порог регистрации может быть существенно снижен, до нескольких кэВ_{nr}, относительно детекторов с регистрацией только сигнала S1.

В эксимерном механизме излучение происходит в вакуумном ультрафиолете, которое проблематично зарегистрировать, поскольку квантовая эффективность фотодетекторов в данном диапазоне стремится к нулю. Для решения этой проблемы используется сместитель спектра, переизлучающий свет в видимый диапазон. Данную схему считывания можно назвать классической или эксимерной.

Показано, что хотя классическая схема считывания широко используется в современных двухфазных детекторах темной материи, она не лишена недостатков. В роли сместителя спектра обычно используют тетрафенилбутadiен (ТФБ), который имеет высокую эффективность переизлучения вакуумного ультрафиолета в видимый диапазон, но может быть нестабильным на больших временных масштабах, отслаиваться от подложки в криогенных условиях и растворяться в жидком аргоне. Другая известная проблема связана с трудностями в достижении однородного уровня нанесения сместителя спектра на большую площадь детектора. Также вакуумный ультрафиолет имеет небольшую длину поглощения (около метра) в жидком аргоне при наличии малых концентраций примесей, что препятствует регистрации первичных сцинтилляций в масштабных детекторах на основе аргона.

Далее рассматриваются механизмы излучения в аргоне: резонансный механизм, эксимерный механизм, механизм атомарной электролюминесценции, механизм тормозного излучения на нейтральных атомах (ТИН). Приводится сравнение механизмов по спектру и интенсивности излучения. Приводится описание двух вариантов альтернативной схемы считывания, которые могут сделать возможной работу детектора без сместителя спектра. В первом варианте (см. рисунок 2 слева), далее именуемым “прямое считывание на КФЭУ-матрицу”, свет образуется в электролюминесцентном зазоре (ЭЛ-зазор) за счет механизма ТИН и считывается напрямую в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах с использованием КФЭУ-матрицы, расположенной непосредственно над ЭЛ-зазором. Во втором варианте (см. рисунок 2 справа), далее именуемым “считывание на ТГЭУ/КФЭУ-матрицу”, ЭЛ-зазор считывается с использованием комбинированного умножителя ТГЭУ/КФЭУ-матрица.

Во второй главе приведено описание экспериментальной установки. На рисунке 3 представлена фотография экспериментальной установки, которая состояла из нескольких подсистем:

- криостата, состоящего из внутренней и внешней камеры;

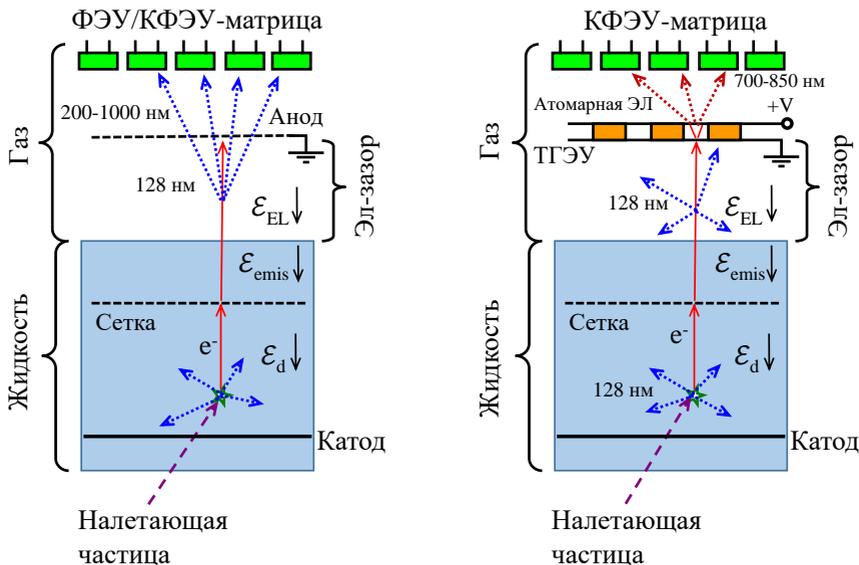


Рисунок 2 — Два варианта альтернативной схемы считывания двухфазных аргоновых детекторов: прямое считывание на КФЭУ-матрицу (слева) и считывание на ТГЭУ/КФЭУ-матрицу (справа). \mathcal{E}_d , \mathcal{E}_{emis} и \mathcal{E}_{EL} - электрические поля в дрейфовом, эмиссионном и электролюминесцентном промежутках соответственно

- источников рентгеновского и гамма-излучения;
- криогенно-вакуумной системы;
- системы питания и сбора данных.

В процессе работы использовалось несколько модификаций экспериментальной установки. В первом цикле измерений для изучения электролюминесценции в видимом диапазоне и координатного разрешения детектора использовался двухфазный криогенный детектор на основе аргона. Во втором цикле измерений для изучения первичных сцинтилляций в видимом диапазоне детектор был модифицирован и использовался как в двухфазном, так и однофазном режимах, с использованием не только чистого аргона, но и аргон-метановой смеси с содержанием метана от 140 ppm до 10% (молярная концентрация).

На рисунке 4 представлена схема внутренней камеры двухфазного детектора в первом цикле измерений. Детектор представлял собой время-проекционную камеру, состоящую из дрейфового зазора и области электронной эмиссии в жидкой фазе, а также электролюминесцентного зазора в газовой фазе. Чтобы сформировать эти области использовались электроды из ТГЭУ. Детектор облучался снаружи либо рентгеновскими лучами от импульсной рентгеновской трубки (средняя энергия регистрируемых фотонов 25 кэВ), либо гамма-квантами от источника ^{109}Cd с низкой



Рисунок 3 — Фотография экспериментальной установки

(22–25 кэВ) и высокой энергией (58–88 кэВ). В обоих случаях использовался коллиматор с диаметром отверстия 2 мм, чтобы получить узкий пучок ионизирующих частиц для исследования координатного разрешения детектора.

Для регистрации светового сигнала использовалась сборка ФЭУ (собранная из Hamamatsu R6041-506MOD), расположенная по периметру ЭЛ-зазора, и КФЭУ-матрица (собранная из Hamamatsu 13360-6050PE), расположенная в верхней части детектора. Для дополнительной электрической изоляции перед сборкой ФЭУ и КФЭУ-матрицей были расположены акриловые пластины, прозрачные для света с длиной волны свыше 350 нм. Сборка ФЭУ представляла собой четыре ФЭУ, три из которых были сделаны чувствительными к вакуумному ультрафиолету при помощи пленок сместителя спектра (на основе ТФБ в полистирольной матрице), нанесенных на акриловый короб. В первом цикле измерений были возможны три конфигурации оптического считывания: считывание на сборку ФЭУ эксимерной электролюминесценции в вакуумном ультрафиолете при помощи сместителя спектра, прямое считывание ТИН электролюминесценции в видимом диапазоне на КФЭУ-матрицу и считывание атомарной электролюминесценции в инфракрасном диапазоне при помощи комбинированного множителя ТГЭУ/КФЭУ-матрица.

Во втором цикле измерений экспериментальная установка была частично модифицирована. Для увеличения светосбора сигнала S1 ТГЭУ0 и ТГЭУ1 (см. рисунок 4) были заменены на ТГЭУ с большей оптической

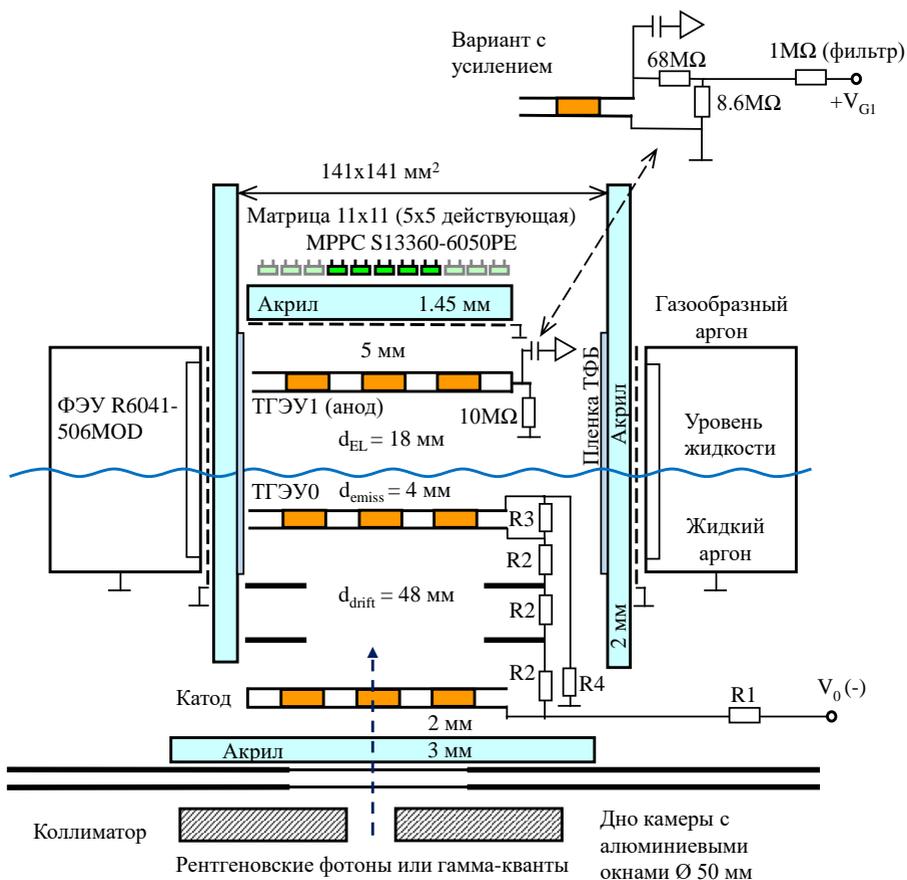


Рисунок 4 — Схема криогенного детектора в первом цикле измерений

прозрачностью, а полеформирующие электроды из ТГЭУ в дрейфовом зазоре были заменены на электроды из стальной проволоки. Также отсутствовал сместитель спектра, чтобы исключить систематическую ошибку, связанную с возможной регистрацией вакуумного ультрафиолета, переизлученного ТФБ. Акриловый короб с ТФБ был заменен на аналогичный по размерам короб без ТФБ, но имеющий повышенную оптическую прозрачность (ультрафиолетовый акрил). Помимо оптического считывания, как в первом, так и во втором циклах измерений производилось считывание зарядового сигнала с ТГЭУ1. Детектор облучался либо снаружи рентгеновским излучением от импульсной рентгеновской трубки, либо изнутри альфа-частицами с энергией 5.5 МэВ от источника ^{238}Pu , расположенного на дне камеры по центру катода.

На рисунке 5 показана эффективность регистрации фотонов при температуре 87.3 К для ФЭУ и КФЭУ (перенапряжение 5.9 В), а также спектры пропускания ультрафиолетовой (УФ) и обычной акриловых пластин.

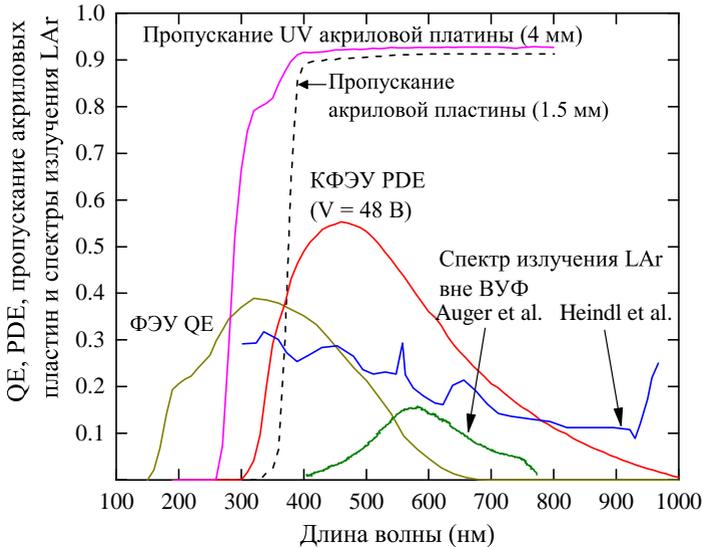


Рисунок 5 — Эффективность регистрации фотонов (PDE) КФЭУ, квантовая эффективность (QE) ФЭУ, коэффициент пропускания акриловых пластин, спектры сцинтилляций жидкого аргона вне ВУФ из работ Heindl et al. и Auger et al.

Третья глава посвящена изучению характеристик двухфазного аргонового детектора с двумя вариантами оптического считывания. Сначала был вычислен световойход ЭЛ-зазора при прямом считывании на КФЭУ-матрицу при облучении детектора гамма-квантами в диапазоне 58–88 кэВ от источника ^{109}Cd . Световойход определялся как отношение числа фотоэлектронов, зарегистрированных КФЭУ-матрицей, к числу электронов, дрейфующих в ЭЛ-зазоре. Максимальный световойход ЭЛ-зазора составил $0.022 \text{ ФЭ}/e^-$ при электрическом поле в ЭЛ-зазоре $7.23 \text{ кВ}/\text{см}$.

Далее был вычислен световойход комбинированного умножителя ТГЭУ/КФЭУ-матрица. Световойход был пропорционален зарядовому усилению ТГЭУ, которое было измерено при облучении детектора рентгеновской трубкой. Максимальное стабильное усиление ТГЭУ составило 37. Для дальнейшего изучения характеристик детектора были выбраны усиления 37 и 9, которые соответствовали напряжению между обкладками ТГЭУ 2.2 кВ и 2.0 кВ соответственно. При облучении детектора гамма-квантами

в диапазоне 58–88 кэВ от источника ^{109}Cd был измерен световой выход, максимальное значение которого составило $0.65 \text{ ФЭ}/e^-$ при зарядовом усилении 37.

Помимо световых выходов была измерена другая важная характеристика детектора - координатное разрешение в x , y плоскости (плоскости КФЭУ-матрицы). Для измерения координатного разрешения сначала были восстановлены координаты точек взаимодействия гамма-квантов с жидким аргоном, используя алгоритм центра тяжести. В данном алгоритме координата вычислялась на основе распределения фотоэлектронов по КФЭУ-матрице при регистрации сигнала S2. Известная особенность алгоритма центра тяжести - наличие систематического смещения восстановленной координаты. Для компенсации систематического смещения была учтена зависимость истинной координаты от восстановленной, используя экспериментальную функцию распределения света. Далее распределение восстановленных координат было аппроксимировано сверткой ожидаемого распределения истинных координат с функцией Гаусса, где свободный параметр σ функции Гаусса характеризовал координатное разрешение.

Координатное разрешение, очевидно, зависит от числа фотоэлектронов. Для построения данной зависимости координатное разрешение детектора было измерено при прямом считывании на КФЭУ-матрицу для различных значений поля в ЭЛ-зазоре, а в случае прямого считывания на ТГЭУ/КФЭУ-матрицу — для различных энергий источника ^{109}Cd (23.5 кэВ и 82 кэВ) и различных зарядовых усилений ТГЭУ (9 и 37) при фиксированном поле в ЭЛ-зазоре. Координатное разрешение не зависело от варианта считывания и определялось только суммарным числом фотоэлектронов, регистрируемых КФЭУ-матрицей: $\sigma = 26 \text{ мм}/\sqrt{N_{PE}}$.

На следующем шаге были определены пороги регистрации в случае двухфазного детектора, оптимизированного для работы с альтернативными схемами считывания (см. таблицу 1). Для оценки порогов регистрации использовались полученные ранее данные по световых выводу и координатному разрешению. В частности, порог регистрации ядер отдачи для прямого считывания на КФЭУ-матрицу составил порядка 6 кэВ $_{nr}$, что достаточно для поиска WIMP с массой выше 10 ГэВ/ c^2 . Для считывания на ТГЭУ/КФЭУ-матрицу порог в три раза ниже, порядка 2 кэВ $_{nr}$, что достаточно для поиска WIMP с массой выше несколько ГэВ/ c^2 . Стоит отметить, что для регистрации WIMP малой массы (менее 1 ГэВ/ c^2) детектор должен обладать минимально возможным энергетическим порогом, достичь которого не так просто при использовании альтернативной схемы считывания. Однако детектор с альтернативной схемой считывания вполне может использоваться для регистрации частиц в случае большого энерговыделения.

Четвертая глава посвящена изучению первичных сцинтилляций в видимом диапазоне в чистом жидком аргоне. Измерения проводились на

Таблица 1 — Пороги регистрации, соответствующие сигналу в 10 ФЭ на КФЭУ-матрице, которые могут быть достигнуты в оптимальных условиях для двух вариантов альтернативной схемы считывания. Также показаны световыходы ЭЛ-зазора

Схема считывания	Порог регистрации для 10 ФЭ,			Световыход ЭЛ-зазора, ФЭ/ e^-
	e^-	$kэV_{ee}$	$kэV_{nr}$	
Прямое считывание на КФЭУ-матрицу (толщина ЭЛ-зазора 1.8 см, $\mathcal{E}_{EL}/N = 8.4$ Тд)	20	2	5.6	0.5
Считывание на ТГЭУ/КФЭУ-матрицу (зарядовое усиление ТГЭУ = 37)	6.2	0.6	1.7	1.6

экспериментальной установке, модифицированной для второго цикла измерений. При облучении детектора рентгеновской трубкой использовался внешний триггер, поэтому детектор работал в однофазном режиме (без сигнала S2). Для регистрации альфа-частиц от источника ^{238}Pu детектор работал в двухфазном режиме, который был необходим для самозапуска по сигналу S2.

Анализ формы сигнала S1 показал, что при регистрации рентгеновского излучения имеется быстрая (<100 нс) и медленная компонента (~ 1 мкс), а при регистрации альфа-частиц — только быстрая. В обоих случаях форма сигнала S1 не зависела от электрического поля в дрейфовом промежутке и качественно совпадала при регистрации света сборкой ФЭУ и КФЭУ-матрицей. В случае регистрации рентгеновского излучения при увеличении дрейфового поля наблюдалось небольшое снижение световыхода, однако это снижение было значительно меньше, чем ожидалось для эксимерного механизма излучения (см. рисунок 6). Это указывает на неэксимерный механизм первичных сцинтилляций в видимом диапазоне в чистом жидком аргоне.

Абсолютный световыход вычислялся как отношение числа фотоэлектронов к выделенной энергии и к эффективности преобразования фотонов в фотоэлектроны. Для альфа-частиц выделенная энергия была точно определена и составляла 5.5 МэВ, а в случае рентгеновского излучения средняя выделенная энергия составляла 186 МэВ и была вычислена по зависимости заряда, наведенного на ТГЭУ1, от дрейфового поля. Эффективность преобразования фотонов в фотоэлектроны была вычислена

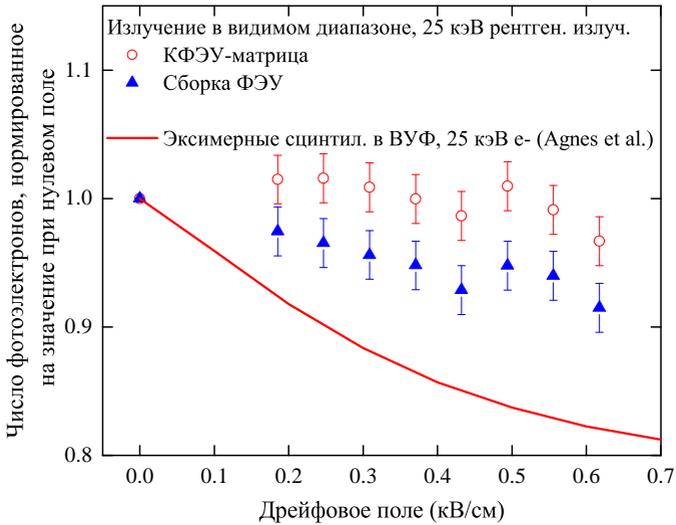


Рисунок 6 — Относительное число фотоэлектронов при первичных сцинтилляциях в видимом диапазоне в зависимости от электрического поля, полученное при регистрации импульсного рентгеновского излучения со средним энерговыделением 25 кэВ при помощи сборки ФЭУ и КФЭУ-матрицы (точки). Для сравнения показан ожидаемый относительный световыход первичных эксцимерных сцинтилляций, вызванный электронами с энергией 25 кэВ (кривая)

методом Монте-Карло в программе Geant4, используя экспериментальные спектры первичных сцинтилляций в видимом диапазоне из работ Heindl et al. и Auger et al. (см. рисунок 5). Для вычисления итогового значения абсолютного световыхода использовались данные с КФЭУ, поскольку они имеют более широкий диапазон спектральной чувствительности, чем ФЭУ. Итоговое значение абсолютного световыхода составило 200 ± 50 фотон/МэВ и 92 ± 23 фотон/МэВ для импульсного рентгеновского излучения и альфа-частиц соответственно.

Полученные значения абсолютного световыхода являются довольно низкими для практического применения в двухфазных детекторах темной материи, где предполагается наблюдение WIMP по регистрации ядер отдачи с энергией менее 10 кэВ_{nr} . Тем не менее первичные сцинтилляции в видимом диапазоне могут найти применение в экспериментах, где регистрируются большие энерговыделения. Механизм возникновения первичных сцинтилляций в видимом диапазоне пока остается неясным, однако некоторые экспериментальные данные указывают на то, что данный механизм может быть вызван эффектом ТИН.

Пятая глава посвящена изучению первичных сцинтилляций в видимом диапазоне в жидком аргоне с примесью метана. Измерения проводились на той же самой экспериментальной установке, что и в предыдущей главе (второй цикл измерений), но с примесью метана в аргоне.

Анализ формы сигнала S1 показал, что при добавке в аргон минимального количества метана (140 ppm) остается только быстрая компонента излучения (<100 нс). Форма сигнала S1 в аргон-метановой смеси почти одинакова как для разных источников излучения (рентгеновская трубка и альфа-источник), так и для разных фотодетекторов (сборка ФЭУ и КФЭУ-матрица), и принципиально не меняется при увеличении содержания метана.

Спектр первичных сцинтилляций в жидкой аргон-метановой смеси отсутствует в литературе и не был измерен в данной работе, поэтому для оценки световыхода использовался спектр излучения в видимом диапазоне в чистом жидком аргоне. Итоговые значения абсолютного световыхода в зависимости от содержания метана представлены на рисунке 7 и в таблице 2.

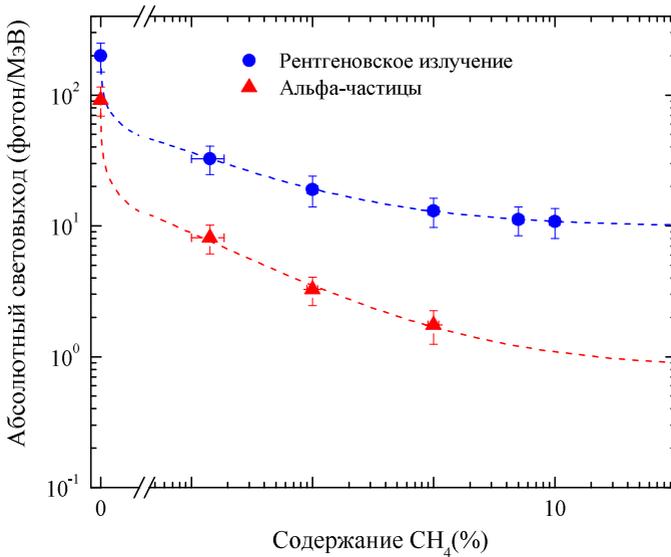


Рисунок 7 — Абсолютный световыход в зависимости от содержания метана. Результаты были получены с использованием данных КФЭУ-матрицы. Пунктирные кривые соответствуют аппроксимации данных сигмоидальной функцией

При содержании метана в 1% (минимум, необходимый для компактного вето-детектора нейтронов) абсолютный световыход в видимом

Таблица 2 — Абсолютный световой выход в диапазоне 400-1000 нм, полученный при регистрации импульсного рентгеновского излучения при нулевом электрическом поле и альфа-частиц при максимальном электрическом поле ($\mathcal{E}_d = 0.62$ кВ/см, $\mathcal{E}_{EL} = 7.81$ кВ/см) в чистом жидком аргоне и его смесях с метаном

Жидкая смесь	Абсолютный световой выход, фотон/МэВ	
	Рентген. излуч., 25 кэВ, $\mathcal{E}_d = 0$ кВ/см	Альфа-частицы, 5.5 МэВ, $\mathcal{E}_d = 0.62$ кВ/см
LAr (100 %)	200±50	92±23
LAr + CH ₄ (140 ppm)	32±8	8.2±2.0
LAr + CH ₄ (0.1 %)	19±5	3.3±0.8
LAr + CH ₄ (1 %)	13.0±3.3	1.8±0.5
LAr + CH ₄ (5 %)	11.3±2.8	-
LAr + CH ₄ (10 %)	11.1±2.8	-

диапазоне для рентгеновского излучения и альфа-частиц составил 13 фотон/МэВ и 1.8 фотон/МэВ соответственно. Используя данные по абсолютному световыходу для рентгеновского излучения, можно оценить, что в нейтронном вето-детекторе при регистрации гамма-квантов, сопровождающих захват нейтронов ядрами аргона или водорода, световой выход составит 78 фотонов и 26 фотонов соответственно. Это довольно низкий световой выход, поэтому жидкий аргон с примесью метана вряд ли может быть использован в качестве рабочей среды для вето-детекторов нейтронов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработан и создан двухфазный детектор на основе аргона с двумя вариантами альтернативной схемы считывания электролюминесцентного сигнала в видимом диапазоне: с прямым считыванием на КФЭУ-матрицу и считыванием на умножитель ТГЭУ/КФЭУ-матрица.
2. Продемонстрировано успешное считывание на КФЭУ-матрицу при температуре жидкого аргона, разработан алгоритм реконструкции координат в двухфазном детекторе, который позволяет учесть систематический сдвиг алгоритма реконструкции, не прибегая к детальному моделированию распространения света в детекторе.
3. Для двухфазного детектора измерен световой выход электролюминесценции в видимом диапазоне и оценен энергетический порог регистрации частиц для двух вариантов альтернативной схемы оптического считывания. При прямом считывании на КФЭУ-матрицу порог регистрации составляет около 6 кэВ_{nr}, что достаточно

для поиска WIMP с массой выше $10 \text{ ГэВ}/c^2$. При считывании на умножитель ТГЭУ/КФЭУ-матрица порог регистрации составляет около 2 кэВ_{nr} , что позволяет создать детектор для поиска WIMP с массой до нескольких $\text{ГэВ}/c^2$.

4. Систематически изучены первичные сцинтилляции в видимом диапазоне в жидком аргоне. Абсолютный световыход первичных сцинтилляций в видимом диапазоне составляет 200 фотон/МэВ для рентгеновского излучения и 92 фотон/МэВ для альфа-частиц. Полученные результаты указывают, что механизм первичных сцинтилляций в видимом диапазоне в жидком аргоне отличается от эксимерного.
5. Впервые изучены первичные сцинтилляции в видимом диапазоне в смесях жидкого аргона с метаном. При добавлении метана в жидкий аргон значительно снижается световыход первичных сцинтилляций в видимом диапазоне, однако при высоком содержании метана (свыше 1%) заметна тенденция выхода на плато. При содержании метана в 1% абсолютный световыход первичных сцинтилляций в видимом диапазоне составляет 13 фотон/МэВ для рентгеновского излучения и 1.8 фотон/МэВ для альфа-частиц. Аргон-метановая смесь имеет низкий световыход и вряд ли может быть использована в вето-детекторе нейтронов.

Перспектива дальнейшей разработки оптических методов считывания в видимом диапазоне в детекторах на основе чистого жидкого аргона заключается в возможности создания масштабных детекторов для поиска редких событий с большим энерговыделением (единицы-десятки МэВ и выше), например, для регистрации нейтрино/антинейтрино. Использование считывания в видимом диапазоне в двухфазных детекторах темной материи на основе чистого жидкого аргона возможно, но затруднительно из-за низкого световыхода первичных сцинтилляций и электролюминесцентного сигнала. Тем не менее электролюминесценция в видимом диапазоне может давать вклад в наблюдаемые сигналы в двухфазных детекторах темной материи при низких (за счет эффекта тормозного излучения на нейтральных атомах) или высоких (за счет атомарной электролюминесценции) электрических полях в электролюминесцентном зазоре, поэтому её изучение является актуальным.

Дальнейшее изучение первичных сцинтилляций в видимом диапазоне в чистом аргоне и аргон-метановых смесях, в частности, измерение спектральных характеристик, позволило бы лучше понять механизм образования излучения. Использовать аргон-метановую смесь в качестве рабочей среды вето-детектора нейтронов затруднительно из-за низкого световыхода первичных сцинтилляций, однако такая смесь может найти применение в адронных калориметрах при большом энерговыделении (десятки-сотни МэВ и выше).

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

В рецензируемых научных изданиях:

1. Characterization of a ^{109}Cd gamma-ray source for the two-phase argon detector / A. Bondar, A. Buzulutskov, A. Dolgov [et al.]. – Текст : электронный // Instruments and Experimental Techniques. – 2019. – Vol. 62. – P. 746–749. – URL: <https://doi.org/10.1134/S0020441219050142>. – Дата публикации: 09.05.2020.
2. Effect of Neutral Bremsstrahlung on the Operation of Two-Phase Argon Detectors / A. Bondar, E. Borisova, A. Buzulutskov [et al.]. – Текст : электронный // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2020. – Vol. 47. – P. 162–165. – URL: <https://doi.org/10.3103/S1068335620060032>. – Дата публикации: 27.07.2020.
3. Observation of primary scintillations in the visible range in liquid argon doped with methane / A. Bondar, E. Borisova, A. Buzulutskov [et al.]. – Текст : электронный // Journal of Instrumentation. – 2020. – Vol. 15. – P. C06053. – URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/06/C06053>. – Дата публикации: 25.06.2020.
4. SiPM-matrix readout of two-phase argon detectors using electroluminescence in the visible and near infrared range / C. E. Aalseth, S. Abdelhakim, P. Agnes [et al.]. – Текст : электронный // The European Physical Journal C. – 2021. – Vol. 81. – P. 153. – URL: <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-020-08801-2>. – Дата публикации: 15.02.2021.
5. Study of visible-light emission in pure and methane-doped liquid argon / A. Bondar, E. Borisova, A. Buzulutskov [et al.]. – Текст : электронный // Journal of Instrumentation. – 2022. – Vol. 17. – P. P09009. – URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/09/P09009>. – Дата публикации: 06.09.2022.

Олейников Владислав Петрович

**Исследование электролюминесценции и первичных
сцинтилляций в видимом диапазоне в детекторах
на основе жидкого аргона**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 16.12.2024.
Подписано в печать 18.12.2024.
Формат 60×90 1/16. Объем 1.0 печ.л., 0.9 уч.-изд.л.
Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 8.

Обработано на ИВМ РС и отпечатано на ротапринте ИЯФ СО РАН
630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11