

УДК 539.1.074.23; 537.563

А. Е. Бондарь^{1,2}, **А. Ф. Бузулуцков**^{1,2}, **А. Д. Долгов**², **С.В. Пелеганчук**^{1,2}
Р. Г. Снопков^{1,2}, **А. В. Соколов**^{1,2}, **Е. О. Шемякина**^{1,2}, **Л. И. Шехтман**^{1,2}

¹ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия

² Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

E-mail: A.F.Buzulutskov@inp.nsk.su

ПРОЕКТ ДВУХФАЗНОГО КРИОГЕННОГО ЛАВИННОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ПОИСКА ТЕМНОЙ МАТЕРИИ И РЕГИСТРАЦИИ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ НЕЙТРИНО *

Представлен проект детектора предельной чувствительности на основе методики двухфазных криогенных лавинных детекторов в Ar, предназначенного для поиска темной материи и регистрации низкоэнергетических нейтрино, в частности когерентного рассеяния нейтрино на ядрах. Детектор с криогенной камерой объемом 160 л будет способен работать в режиме счета одиночных электронов первичной ионизации с рекордным (~ 1 мм) пространственным разрешением. Для достижения таких характеристик применяется оригинальный метод регистрации ионизационного сигнала в газовой фазе, а именно оптическое считывание с использованием комбинированного умножителя на основе газовых электронных умножителей и матрицы гейгеровских лавинных фотодиодов.

Ключевые слова: темная материя, когерентное рассеяние нейтрино на ядрах, двухфазные криогенные лавинные детекторы, газовые электронные умножители, гейгеровские лавинные фотодиоды.

Введение

Прямой поиск частиц темной материи (WIMP – Weakly Interacting Massive Particle) производится в детекторах темной материи по наблюдению событий их предполагаемого упругого рассеяния на атомных ядрах вещества детектора [1–3]. Для ядер отдачи, образованных в результате такого взаимодействия WIMP со средой, предсказывается энергия в диапазоне от 0 до нескольких десятков килоэлектронвольт и энергетический спектр, близкий к экспоненциальному. В свете последних положительных результатов по возможной регистрации легких WIMP с массой порядка 10 ГэВ в таких экспериментах, как DAMA/LIBRA [4], CoGeNT [5], CREST [6] и CDMS [7], и отрицательных

результатов экспериментов XENON10 [8], XENON100 [9] и ZEPLINIII [10] наибольший интерес представляют малые энергии ядер отдачи – менее 8 кэВ.

Аналогично для регистрации низкоэнергетических нейтрино (менее 20 МэВ), и в частности процесса когерентного рассеяния нейтрино на ядрах [11; 12], также требуется регистрация ядер отдачи с очень низкой энергией – менее 0,5 кэВ, что, например, в детектирующей среде жидкого Ar соответствует предельно малому количеству электронов первичной ионизации – менее 5.

Таким образом, для эффективной регистрации частиц темной материи и низкоэнергетических нейтрино необходимо создание детектора ядер отдачи предельной чувствительности, способного работать в режиме

* Работа поддержана Правительством Российской Федерации (грант № 11.G34.31.0047) и Российским фондом фундаментальных исследований (гранты № 12-02-12133-офи_м; 12-02-91509-ЦЕРН_a).

счета одиночных электронов первичной ионизации [2].

В двухфазных детекторах темной материи и когерентного рассеяния нейтрино на ядрах на основе конденсированных благородных газов [2; 3] поиск взаимодействия WIMP или нейтрино с веществом детектора осуществляется 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. Причем первичная сцинтилляция в жидком благородном газе происходит в основном в вакуумном ультрафиолете (ВУФ): на длине волны 175 нм для Xe и 130 нм для Ar.

Ионизационный сигнал (S2) регистрируется следующим образом. В газовую фазу детектора электроны первичной ионизации транспортируются электрическим полем, приложенным к объему детектора перпендикулярно к поверхности жидкости. Под действием поля электроны эмитируются из жидкости в газовую фазу, где они производят электролюминесценцию (ЭЛ) (или пропорциональную сцинтилляцию, поскольку амплитуда ЭЛ сигнала примерно пропорциональна величине электрического поля) в ЭЛ-зазоре. ЭЛ обеспечивает высокий выход ультрафиолетовых фотонов – до 500–2 000 (в зависимости от приложенного поля и толщины ЭЛ-зазора) на один дрейфующий электрон.

В традиционных двухфазных детекторах темной материи используются два канала регистрации ядер отдачи – по сцинтилляционному (S1) и ионизационному (S2) сигналам, которые регистрируются фотоумножителями (ФЭУ). Как правило (эксперименты XENON100 [9] и ZEPLINIII [10]), верхняя сборка ФЭУ предназначена для регистрации S2 сигнала и расположена в газовой фазе двухфазного детектора, а нижняя сборка расположена в жидкой фазе и предназначена для регистрации S1 сигнала. Последняя также регистрирует S2 сигнал, но с меньшей эффективностью. По соотношению S1 и S2 сигналов определяется сорт взаимодействовавшей частицы и выделяются только полезные события, когда образовалось ядро отдачи.

Следует отметить, однако, что для энергий ядер отдачи менее 7 кэВ регистрация

сцинтилляционного сигнала S1 как более слабого по сравнению с S2 существенно затруднена. Именно это определяло относительно высокий порог регистрации (7 кэВ) в экспериментах на Xe, в частности XENON100 [9] и ZEPLIN [10]. Для экспериментов на Ar, конкретно WArP, порог вообще составлял 40 кэВ [13]. В принципе выделение ядер отдачи возможно и при одноканальном способе регистрации – только по ЭЛ-сигналу (S2), аналогично тому, как это было сделано в XENON10 [8]. В этом случае можно будет существенно понизить порог регистрации, вплоть до долей килоэлектронвольт (в XENON10 он был понижен до 1,4 кэВ [8]). При этом, однако, значительно возрастают требования на пространственное разрешение детектора (вплоть до ~ 1 мм), необходимое для подавления фона, и на уровень собственных шумов.

В детекторах на основе ФЭУ невозможно достичь такого высокого пространственного разрешения из-за существующих ограничений на размер ФЭУ (обычно 3 дюйма), их количество и стоимость. В этой связи одним из перспективных разрабатываемых направлений является концепция двухфазных криогенных лавинных детекторов (КЛД, или CRAD) на основе газовых электронных умножителей (ГЭУ, или GEM) [2] с оптическим считыванием при помощи гейгеровских лавинных фотодиодов (ГЛФД, или GAPD) [2; 14; 15]. Как будет видно из дальнейшего, такие двухфазные КЛД с комбинированным умножителем ГЭУ/ГЛФД-матрица, т. е. с комбинированным зарядовым и оптическим усилением сигнала, позволяют обеспечить высокое пространственное разрешение детектора, порядка 1 мм, причем при минимальном пороге, вплоть до счета одиночных электронов, что недостижимо для детекторов на основе ФЭУ.

Двухфазные КЛД с оптическим считыванием на основе комбинированного умножителя ГЭУ/ГЛФД в Ar

Двухфазные КЛД по определению суть детекторы, работающие в режиме газового лавинного усиления при криогенных температурах в благородном газе, находящемся в двухфазном состоянии (жидкость-газ) (см. обзор [2]). Именно обнаруженная сотрудниками нашей лаборатории уникальная

способность ГЭУ работать в чистых благородных газах с высоким усилением [16] позволила успешно использовать каскадные ГЭУ в криогенных лавинных детекторах и, что особенно важно, обеспечить стабильную работу двухфазных детекторов в лавинном режиме.

Для работы с минимальным порогом детектор темной материи должен быть способен работать в режиме счета одиночных электронов, причем в режиме самозапуска и с минимальным уровнем собственных шумов. В Ar и Xe это соответствовало бы порогу регистрации ядер отдачи с энергией ниже 0,1 кэВ. Для двухфазных детекторов на основе ГЭУ это означает, что ГЭУ должны стабильно работать с усилением порядка $\sim 2 \times 10^4$ [17]. Достигнутый уровень чувствительности в двухфазных лавинных детекторах на основе ГЭУ при работе в режиме самозапуска пока в несколько раз ниже; в лучшем случае он соответствует порогу регистрации 4 начальных электронов для трехкаскадного тонкого ГЭУ и 20 электронов для двухкаскадного толстого ГЭУ (ТГЭУ) [18], при усилениях около 5 000 и 1 500 соответственно, т. е. явно недостаточен.

В нашем проекте предлагается использовать Ar в качестве детектирующей среды. Ниже перечислены преимущества Ar перед Xe, которые являются предпосылками для разработки детектора нового типа для темной материи и низкоэнергетических нейтрино на основе методики двухфазных криогенных лавинных детекторов с оптическим считыванием.

1. В нашей работе [19] показано, что в двухфазном Ar электрическое поле, необходимое для эффективной (100 %) эмиссии электронов из жидкой фазы в газовую, гораздо меньше, чем считалось ранее, – всего 1–1,5 кВ/см, что в 5 раз меньше, чем в Xe [3]. Это уменьшает рабочие напряжения в детекторе, что немаловажно для технической реализации больших рабочих площадей (1 м²) и длин дрейфа (1 м).

2. Полная эмиссия в Ar при относительно низких полях способствует уменьшению частоты одноэлектронных шумов, обусловленных эмиссией задержанных электронов, скапливающихся под поверхностью жидкости из-за не стопроцентной эффективности эмиссии. В двухфазном Xe, где 100 % эффективности эмиссии очень трудно достичь,

такие одноэлектронные сигналы являются одним из основных препятствий для понижения порога регистрации до уровня счета одиночных электронов ионизационного сигнала S2 [20].

3. В Ar гораздо проще поддерживать необходимую чистоту жидкости из-за более низкой рабочей температуры и меньшей растворяющей способности, по сравнению с Xe. Например, можно легко достичь пробега электронов в жидком Ar около метра, даже при наличии стеклотекстолитовых электродов метровых размеров (см., например, [21]), что совершенно невозможно в Xe.

4. В двухфазном Ar можно эффективно использовать каскадные газовые электронные умножители, как стандартные (тонкие) ГЭУ [22], так и толстые ГЭУ (ТГЭУ, или THGEM) [23], для усиления ионизационного сигнала S2 в газовой фазе, причем на порядок с более высокими усилениями (до 5 000), чем в Xe (до 600) (см. обзор [2] и серию наших работ [18; 24–26]). Было показано, что в двухфазных КЛД в Ar успешно работают как стандартные ГЭУ [24], так и ТГЭУ [18; 25; 26], причем наибольшей эффективностью с точки зрения максимального усиления и устойчивости к пробоям обладает гибридный умножитель ТГЭУ/ГЭУ (THGEM/GEM) [26].

5. В Ar в газовой фазе было обнаружены интенсивные сцинтилляции в ближней инфракрасной (ИК) области – в диапазоне 690–950 нм [27]. В серии наших недавних работ [15; 28; 29] было показано, что высоким световыходом обладают как первичные сцинтилляции – около 17 000 фотонов/МэВ [28; 29], т. е. того же порядка, что и в ВУФ области [3], так и вторичные (лавинные) сцинтилляции в отверстиях ГЭУ со световыходом 4 фотона на электрон лавины [2; 15]. В данном случае лавинными сцинтилляциями называется электролюминесценция в условиях газового усиления в сильном электрическом поле, интенсивность которой уже не пропорциональна величине поля. Следует отметить, что световыход как первичных, так и вторичных сцинтилляций в газообразном Ar в ближней ИК области (700–1000 нм) на порядок выше, чем в Xe [2; 25].

6. Обнаружение интенсивных инфракрасных сцинтилляций в газообразном Ar позволяет применить оптический метод считывания сигналов с ГЭУ с использова-

нием ГЛФД [2; 15; 29–31], называемых также GAPD, SiPM, MPPC или MRS APD. Другими словами, в двухфазном КЛД используется комбинированный умножитель ГЭУ/ГЛФД-матрица, обеспечивающий высокое пространственное разрешение – порядка 1 мм [31]. Причем в этом случае, в отличие от регистрации сцинтилляций в ВУФ области, не требуется применение сместителей спектра, так как ГЛФД имеет высокую эффективность регистрации фотонов в диапазоне 700–900 нм – около 15%. В Хе, напротив, из-за более низкого световыхода лавинных сцинтилляций в области чувствительности ГЛФД [2; 25] эффективное оптическое считывание ГЭУ на ГЛФД возможно только в ВУФ области, т. е. с использованием сместителей спектра, что уменьшает эффективный световыход и усложняет конструкцию.

7. ГЛФД намного успешнее работают при криогенных температурах жидкого Аг, чем при комнатных [15; 30], с частотой собственных шумов порядка Герца при 87 К, т. е. на 3–4 порядка меньше, чем у ФЭУ при криогенных температурах [32]. При регистрации одноэлектронного сигнала должна применяться схема оптического считывания с организацией совпадений между каналами ГЛФД-матрицы для подавления одноканальных шумов, аналогичная схеме с ФЭУ и электролюминесценцией в стандартных двухфазных детекторах темной материи.

8. Аг гораздо дешевле Хе, это позволяет снизить конечную стоимость проекта и, что важнее, масштабировать детектор до немыслимых для Хе величин – до десятков и сотен тонн криогенной жидкости.

Рассмотрим принципы работы предлагаемого нами двухфазного криогенного лавинного детектора в Аг с оптическим считыванием с комбинированным умножителем ГЭУ/ГЛФД-матрица (ранее представленных в [2]), основанных на рассмотренных выше достоинствах (рис. 1). Сцинтилляционный сигнал S1 в таком детекторе регистрируется так же, как и в традиционных двухфазных детекторах, – с помощью матрицы ФЭУ, расположенных в жидком Аг на дне криогенной камеры. Новым, в отличие от традиционной схемы, является то, что ионизационный сигнал S2 после эмиссии электронов из жидкости регистрируется в газовой фазе в Аг дважды: как с помощью той же матрицы ФЭУ на дне камеры и кольца ФЭУ

по периметру Эл-зазора, так и с помощью комбинированного умножителя ГЭУ/ГЛФД-матрица, расположенного сверху в газовой фазе. При этом ФЭУ обеспечивают хорошее амплитудное разрешение сигнала S2 и триггер от него, а ГЭУ/ГЛФД-матрица – хорошее пространственное разрешение. ГЭУ/ГЛФД умножитель состоит из 2–3 каскадов толстого (0,5 мм) и тонкого (0,05 мм) ГЭУ и матрицы ГЛФД (без сместителей спектра), расположенной за ними. Матрица ГЛФД осуществляет оптическое (позиционно-чувствительное) считывание сигнала с последнего ГЭУ за счет интенсивных лавинных сцинтилляций в отверстиях ГЭУ в ближней ИК области. ГЛФД располагаются с шагом порядка 10 мм на расстоянии 5–10 мм от последнего ГЭУ, имея перекрывающиеся поля зрения под углом $\pm 45^\circ$. Такое расположение позволяет, с одной стороны, иметь хорошее пространственное разрешение (по методу центра тяжести – до 1 мм), с другой стороны, экономить число каналов. Например, для детектора с объемом жидкости $40 \times 40 \times 40 \text{ см}^3$, содержащего 100 кг Аг, количество ГЛФД составит 1 600, что вполне приемлемо.

Принципиальная работоспособность такой схемы была продемонстрирована в наших исследованиях. В частности, было показано, что усиление комбинированного умножителя ГЭУ/ГЛФД в двухфазном Аг достаточно для эффективной регистрации одиночных электронов, эмитированных из жидкости [15]. Так, при усилении каскада ГЭУ порядка 1 000 и угле зрения ГЛФД в $\pm 45^\circ$, число фотоэлектронов (ф. э.) только на одном ГЛФД от одного первичного электрона ионизации, эмитированного из жидкости, может в среднем составить около 8 ф. э. при равномерном распределении событий по поверхности жидкости, а суммарно на всех ГЛФД-матрицах – в несколько раз больше. Это обеспечивает эффективную работу в режиме счета одиночных электронов первичной ионизации.

Оригинальность такой схемы двухфазного КЛД в Аг состоит в том, что она позволяет улучшить точность определения координат событий в горизонтальной плоскости при малых энерговыделениях ($< 5 \text{ кэВ}$) до миллиметрового уровня. В настоящее время в двухфазных детекторах с применением ФЭУ она составляет порядка сантиметра, что ведет к уменьшению эффективной экс-

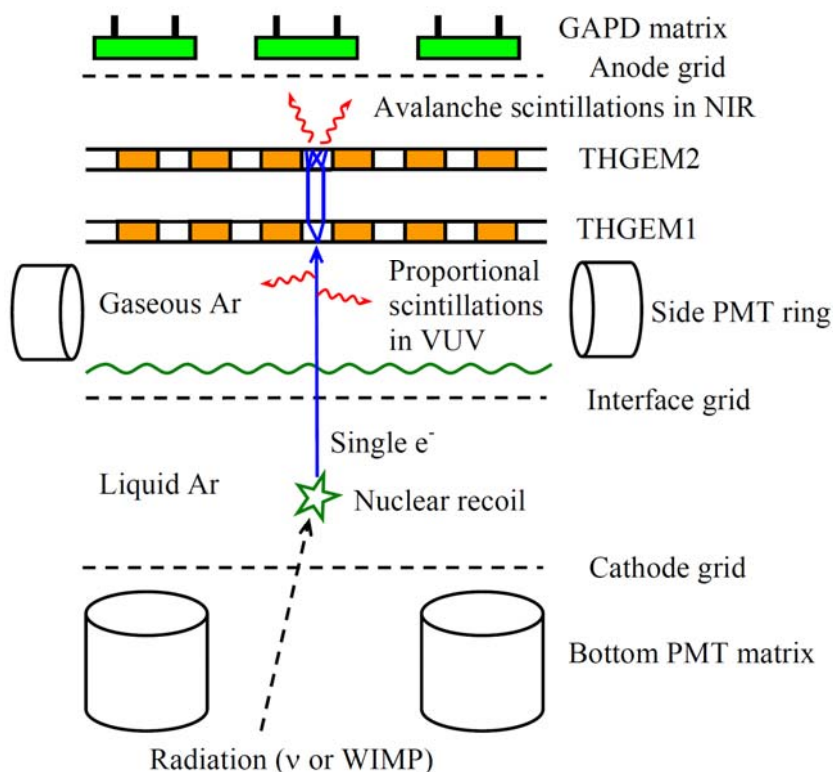


Рис. 1. Принцип работы двухфазного КЛД в Ar с оптическим считыванием с комбинированным умножителем ГЭУ/ГЛФД-матрица

позиции. Оригинальной является идея использовать ГЛФД без сместителя спектра для регистрации лавинных сцинтилляций в ближней ИК области, что позволит обойти проблемы создания эффективного переизлучателя и его воздействия на чистоту жидкости. Существенным улучшением является возможное уменьшение порога регистрации ядер отдачи в Ar по сравнению с Xe (см. выше).

Проект полномасштабного детектора для поиска темной материи и регистрации когерентного рассеяния нейтрино на ядрах

С учетом перечисленных выше проблем и возможных способов их решения, нами был разработан проект полномасштабного детектора для поиска темной материи и регистрации когерентного рассеяния нейтрино на ядрах, который представлен ниже.

Двухфазный КЛД с криогенной камерой объемом 160 л. Схема такого КЛД для поиска темной материи и регистрации низко-

энергетических нейтрино, разрабатываемого в нашей лаборатории, была впервые публично представлена в 2012 г. [29]. Рассмотрим детально ее основные системы и компоненты (рис. 2).

Детектор состоит из криогенной камеры с вакуумной изоляцией диаметром 50 см.

и высотой 80 см, объемом 160 л. Максимальная длина дрейфа электронов в жидкости – 50 см, и рабочая область диаметром 36 см определяют рабочий (чувствительный) объем детектора в 50 л, соответствующий 70 кг жидкого Ar. Общее количество жидкого Ar, используемого в камере, составляет 150 л (200 кг).

Электроны первичной ионизации, производимые ядрами отдачи от слабо взаимодействующих частиц темной материи или нейтрино, дрейфуют в жидкости к ее поверхности под действием электрического поля напряженностью 2 кВ/см. Электроны эмитируются из жидкой фазы в газовую. Там их сигнал усиливается в два этапа: во-первых, с помощью электролюминесценции, т. е. пропорциональных (вторичных) сцин-

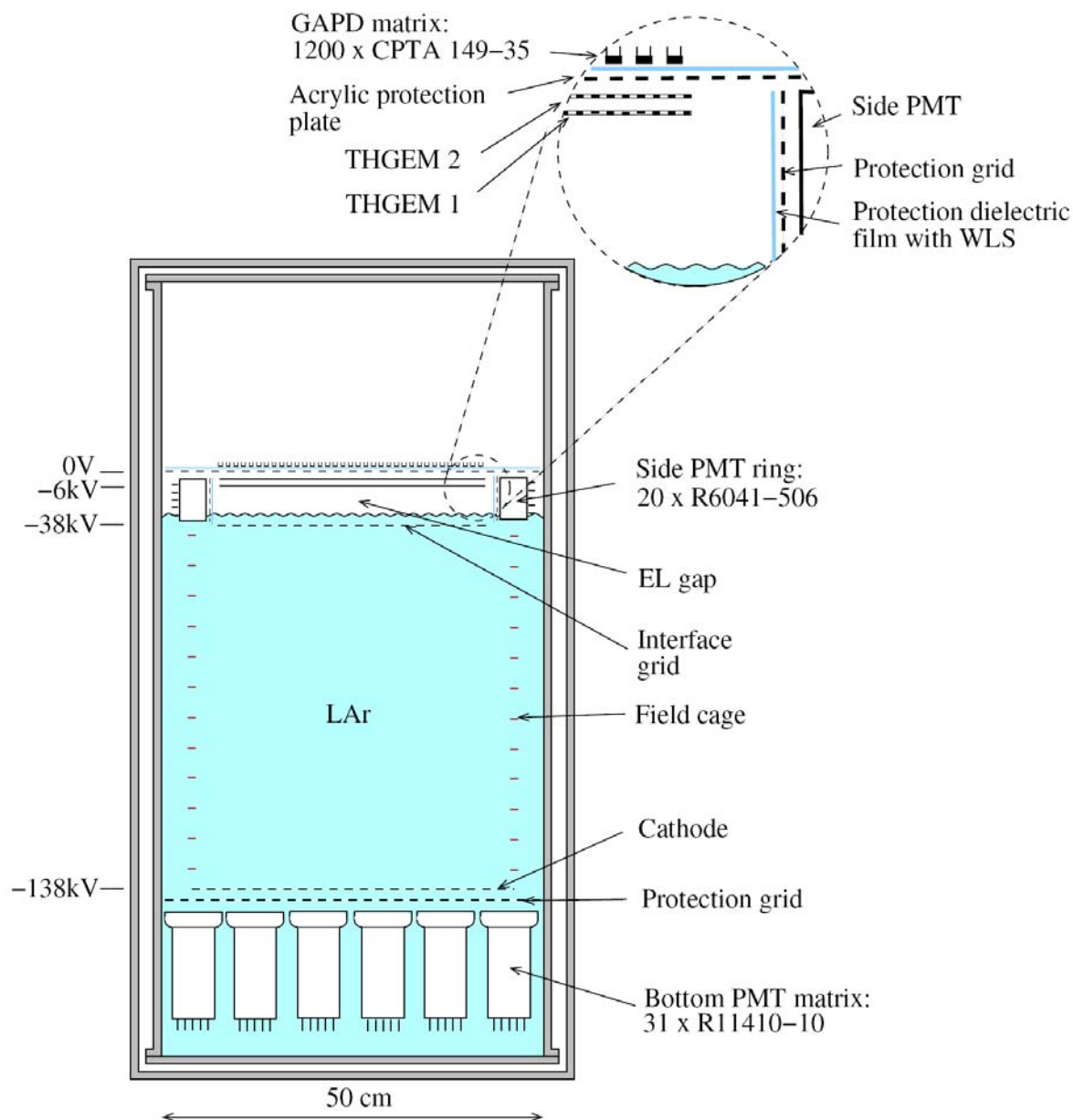


Рис. 2. Схема двухфазного КЛД в Ar с оптическим считыванием с комбинированным умножителем ГЭУ/ГЛФД-матрицы для поиска темной материи и регистрации когерентного рассеяния нейтрино (объем криогенной камеры 160 л)

тилляций в ВУФ-области спектра в ЭЛ-зазоре в газе над границей раздела фаз; во-вторых, с помощью лавинных сцинтилляций в ИК области спектра, произведенных в двухкаскадном толстом ГЭУ (2THGEM) или в трехкаскадной гибридной усилительной структуре 2THGEM/GEM.

Пропорциональные сцинтилляции регистрируются в ВУФ-диапазоне с использованием двух сборок ФЭУ: с помощью матрицы нижних ФЭУ, размещенных в жидкости

на дне камеры, и с помощью кольца боковых ФЭУ, размещенных вокруг электролюминесцентного зазора.

Матрица нижних ФЭУ состоит из 31 низкофонового криогенного 3-дюймового ФЭУ. Они специально сконструированы для работы в низкофоновых экспериментах в жидком Ar и Xe, а именно Hamamtsu R11410-20 или R11065-20, с динодной системой с линейной фокусировкой и бищелочным фотокатодом (64 мм в диаметре).

Кольцо боковых ФЭУ состоит из 20 низкофоновых криогенных 2-дюймовых ФЭУ, а именно Hamamatsu R6041-506 с динодной системой на основе металлических каналов, что делает их довольно компактными, и бищелочным фотокатодом (45 мм в диаметре).

Чтобы быть чувствительным к сцинтилляциям в ВУФ-диапазоне, все ФЭУ снабжаются спектросмещающим покрытием (тетрафенилбутадиен, ТРВ), нанесенным либо на прозрачную диэлектрическую пленку перед ФЭУ, либо непосредственно на окно ФЭУ.

Нижние ФЭУ будут также использоваться для регистрации сигнала от первичных сцинтилляций в рабочем объеме детектора.

Нижние и боковые ФЭУ вырабатывают триггер на события с одним, двумя, тремя и т. д. электронами первичной ионизации за счет того, что они имеют превосходное амплитудное разрешение при работе в режиме пропорциональных сцинтилляций. Телесный угол матрицы нижних ФЭУ и кольца боковых ФЭУ относительно ЭЛ-зазора составляет соответственно 3 и 6 % от полного телесного угла. Во избежание электрических пробоев с высоковольтных электродов на ФЭУ и проникновения электрического поля в динодную систему нижние ФЭУ защищены проволочной сеткой, в дополнение к слою жидкого Ag, который действует как хороший изолятор, в то время как боковые ФЭУ защищены прозрачной диэлектрической пленкой со сместителем спектра и еще одной проволочной сеткой.

ЭЛ-зазор имеет толщину 4 см, что соответствует размеру боковых ФЭУ. Кроме того, электрическое поле в зазоре равно 8 кВ/см, что достаточно для того, чтобы одиночные дрейфующие электроны могли излучать достаточно света для эффективной регистрации с помощью ФЭУ. Количество фотонов в ВУФ-диапазоне на дрейфующий электрон при таком поле ($E/N = 10$ Td) ожидается равным 2 000 [33]. Учитывая общий телесный угол боковых и нижних ФЭУ (9 %), их квантовую эффективность (25 %) и эффективность переизлучения сместителя спектра (50 %), общее количество фотоэлектронов, зарегистрированных ФЭУ, составит 23 ф. э. Этого достаточно, для того чтобы можно было сделать выбор между событиями с одним и двумя электронами первичной ионизации.

Лавинные сцинтилляции в отверстиях последнего толстого ГЭУ регистрируются в ИК диапазоне с помощью матрицы ГЛФД: это обеспечивает высокое (несколько миллиметров) пространственное разрешение. Матрица состоит из 1 200 ГЛФД типа ЦПТА 149-35, либо Hamamatsu S10931-100P, с рабочей площадью каждого ГЛФД $2,1 \times 2,1$ или 3×3 мм² соответственно, расположенных в виде гексагональной или квадратной решетки с шагом 1 см на расстоянии около 1 см от последнего толстого ГЭУ.

Использование боковых ФЭУ с телесным углом, превышающим телесный угол нижних ФЭУ, в принципе позволяет обойтись без нижних ФЭУ при регистрации пропорциональных сцинтилляций. В этом случае рабочий объем может быть увеличен за счет увеличения максимальной длины дрейфа. Кроме того, тогда может быть реализовано интересное техническое решение для электролюминесцентного зазора: проволочная сетка под поверхностью жидкости может быть заменена толстым ГЭУ, который является конструктивно более надежным. При этом дрейфующие электроны могут эффективно пропускаться через отверстия за счет подачи определенного напряжения между его электродами. Такое техническое решение поможет решить проблему плоскостности, которая имеет важное значение для электролюминесцентного зазора, работающего при высоких электрических полях.

Альтернативное (но менее предпочтительное) решение заключается в отказе от боковых ФЭУ. В этом случае нижние ФЭУ должны быть расположены ближе к электролюминесцентному зазору, чтобы компенсировать потерю телесного угла. Уменьшение рабочего объема можно частично компенсировать увеличением рабочей области, что было трудно сделать ранее из-за боковых ФЭУ. В частности, для рабочей области диаметром 45 см и максимальной длины дрейфа 20 см, рабочий объем составит 30 л, что не так уж и мало. В то же время телесный угол нижних ФЭУ составит 10 %, что достаточно для регистрации одиночных электронов.

Уникальность представленного двухфазного КЛД состоит в его способности отбирать события с двумя и более электронами первичной ионизации, рожденными в одной точке, что позволит подавить фон от одиночных электронов. Соответственно по сравне-

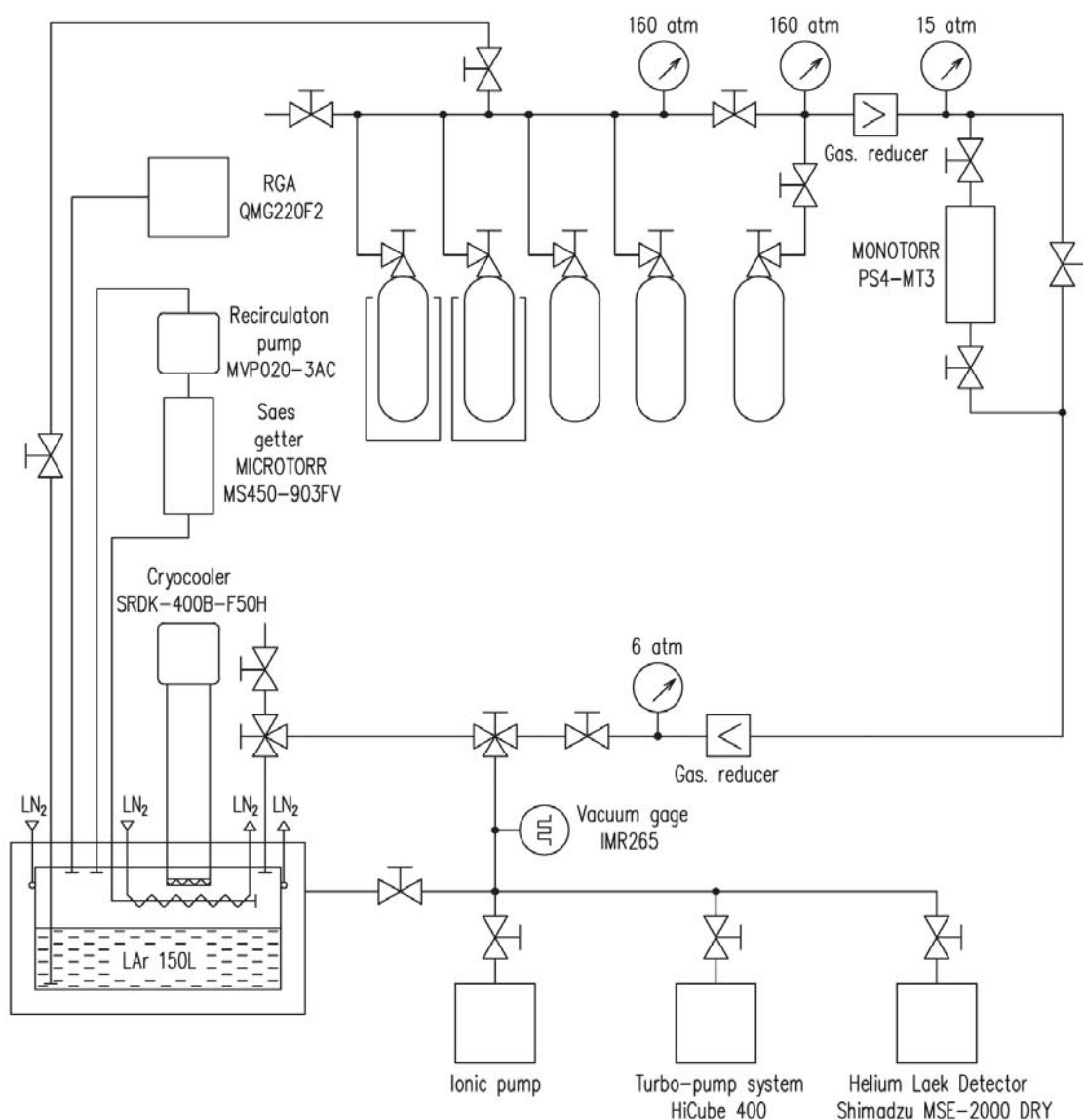


Рис. 3. Схема криогенной и вакуумной системы двухфазного КЛД с криогенной камерой объемом 160 л

нию с другими низкофоновыми детекторами на основе благородных газов предлагаемый детектор будет иметь существенные преимущества, а именно более высокое пространственное разрешение и более низкий порог регистрации, что увеличит его чувствительность к частицам темной материи.

Таким образом, двухфазный КЛД с криогенной камерой 160 л должен комплектоваться следующими умножителями:

- ФЭУ Hamamatsu R11410-20 или R11065-20 – 31 штука;
- ФЭУ Hamamatsu R6041-506 – 20 штук;

- толстые и тонкие ГЭУ – 2–3 слоя с активной площадью диаметром 36 см;
- ГЛФД ЦПТА 149-35 или Hamamatsu S10931-100P – 1 200 штук.

Криогенная и вакуумная система двухфазного КЛД с криогенной камерой объемом 160 л представлена на рис. 3. Она включает в себя:

- систему откачки, поиска вакуумных течей и анализа состава остаточных газов;
- систему сжижения газа с его сопутствующей очисткой и стабилизации температуры;

- систему рециркуляции Ar с очисткой для достижения необходимой чистоты и обеспечения длины дрейфа электронов в жидком Ar не менее 50 см;

- систему хранения газа и его подачи в детектор;

- систему контроля длины дрейфа электронов в жидкости, аналогичную применявшейся в эксперименте ICARUS [34]. Она использует Xe импульсные лампы, кварцевое волокно и металлический фотокатод, погруженный в криогенную жидкость.

Таким образом, двухфазный КЛД с криогенной камерой 160 л должен комплектоваться следующими компонентами (см. рис. 3):

- насосы, течеискатель и газоанализатор;

- криоголовка (криорефрижератор) и фильтры очистки от кислорода и воды;

- рециркуляционный насос и система очистки SAES от азота и углеводородов;

- импульсная ксеноновая лампа и оптическое волокно;

- газовые баллоны и др.

Электроника: источники питания и система сбора данных. Система питания (рис. 4) должна обеспечивать двухфазный КЛД на-

пряжениями от 5 В до 150 кВ. Она будет изготовлена на основе модулей, выпускаемых фирмой CAEN.

Для питания катода и электродной системы в жидкости будет использоваться высоковольтный источник Spellman SL100N150, напряжением до 100 кВ и током до 1,5 мА.

Питание ФЭУ и ГЛФД будет осуществляться универсальной системой SY4527 с сенсорным дисплеем, дополнительно оборудованной модулем питания, мощностью 600 Вт.

Питание ФЭУ, нижних и боковых, будет поступать от модуля A2932N на 48 каналов, с напряжением до 3 кВ в каждом. Для подачи рабочего напряжения на ГЛФД будет использован 12-канальный модуль A1510 на 100 В. Кроме того, для питания предусилителей системы сбора данных будет использоваться шестиканальный модуль A1513, напряжением до 10 В и током на канал до 2,7 А.

Еще одним элементом системы питания являются высоковольтные блоки N570 (2 шт.) и N1470 (3 шт.), которые изготовлены в стандарте NIM. Блоки N570 предназначены для питания анодной сетки. Блоки N1470

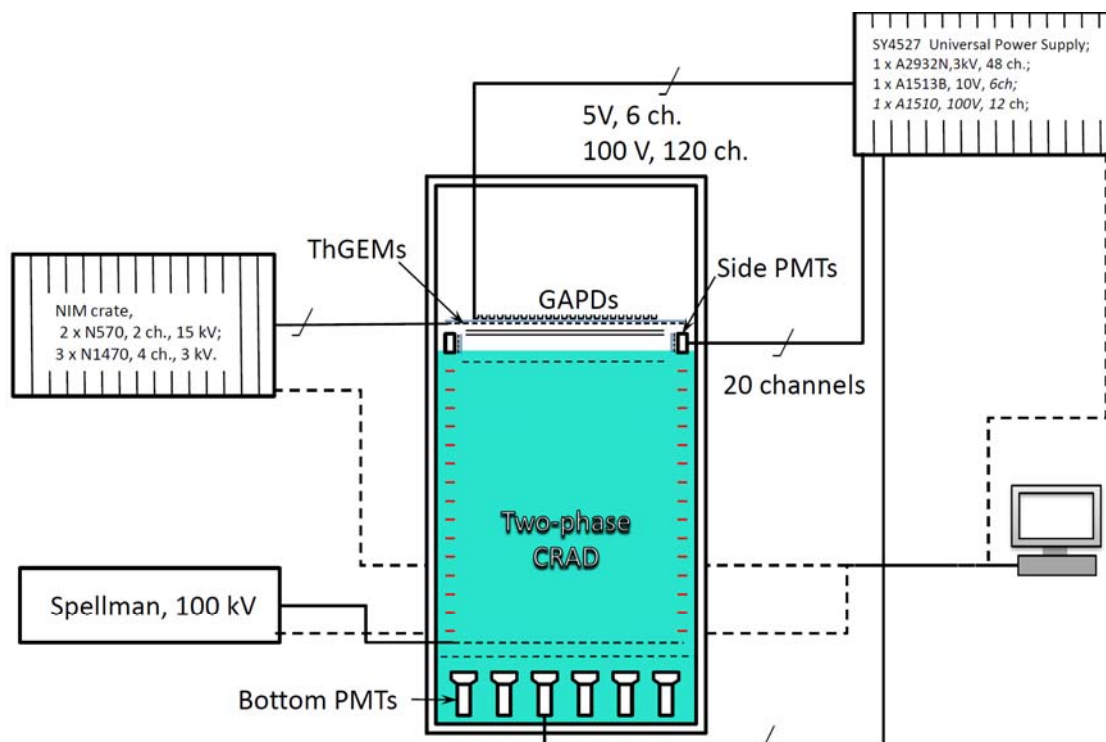


Рис. 4. Схема питания двухфазного КЛД с криогенной камерой объемом 160 л

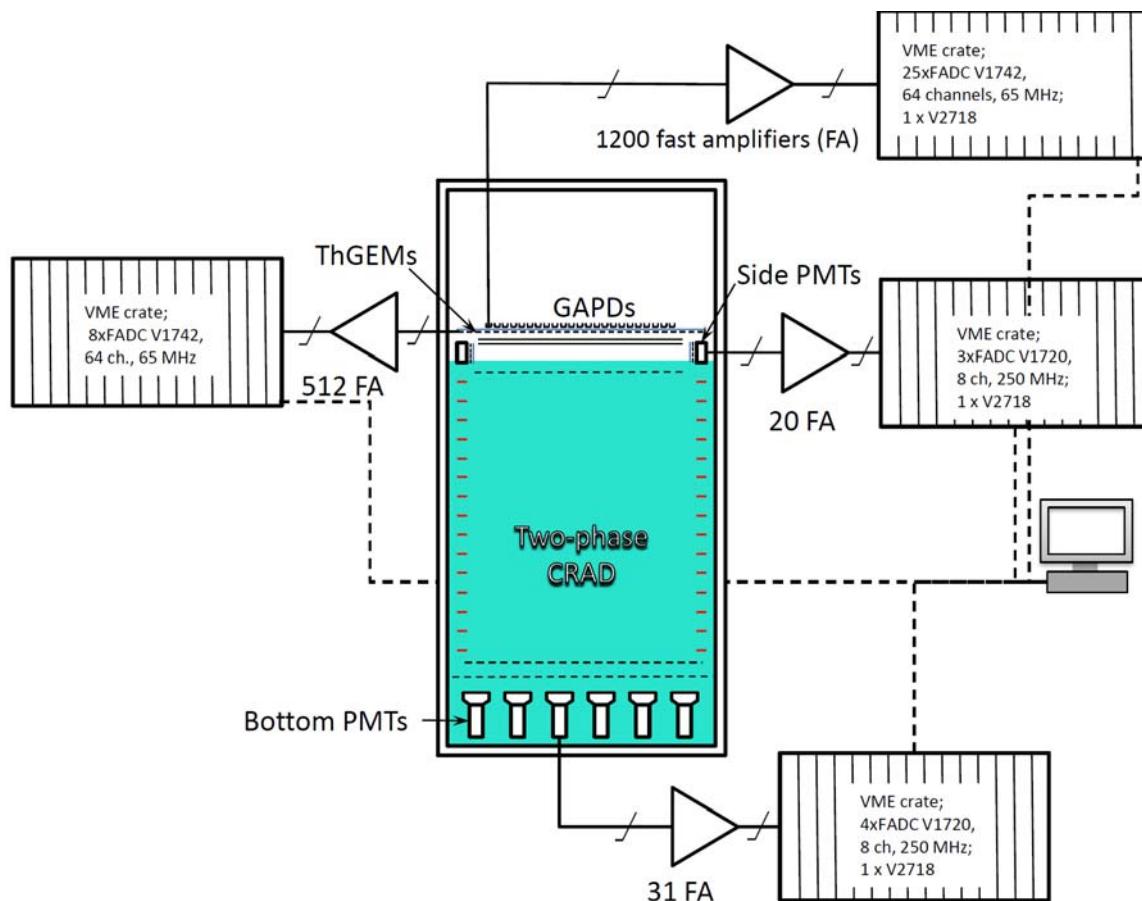


Рис. 5. Схема системы сбора данных двухфазного КЛД с криогенной камерой объемом 160 л

будут использоваться для питания делителей ГЭУ.

Блоки N570 и N1470 устанавливаются в крейт для электронных модулей стандарта NIM – NIM8301. Каждый крейт позволяет установить до 12-ти модулей стандартной ширины.

Система сбора данных (рис. 5) предназначена для считывания, оцифровки и записи в компьютер электронных сигналов, поступающих со всех чувствительных элементов детектора: ФЭУ, ГЭУ и ГЛФД. Поскольку все электронные сигналы будут достаточно слабыми, то, прежде чем обрабатывать, их необходимо усилить с помощью быстрых усилителей (полоса пропускания от 1 до 600 МГц). На рис. 5 усилители обозначены аббревиатурой FA (Fast Amplifier – быстрый усилитель). Как было сказано, для питания предусилителей будет использоваться модуль A1513, универсальной системы питания SY4527.

Усиленный сигнал затем оцифровывается. Для этого используются АЦП непрерывного действия (Flash Analog to Digital Converter – FADC). Главное преимущество таких АЦП, помимо высокого быстродействия, – это возможность восстановления формы сигнала, что должно облегчить подавление фоновых событий. В качестве АЦП для online анализа формы сигналов, включая их амплитудные распределения, а также для настройки системы сбора данных и системы триггера будет использоваться уникальный 4-канальный осциллограф LeCroy WR HRO 66Zi с опцией WR6ZI-SPECTRUM (600 МГц, АЦП 12 бит). Его уникальность, в частности, обусловливается 12-разрядностью АЦП, что существенно увеличивает динамический диапазон амплитудных измерений.

Для сбора данных с большого числа каналов будут использоваться АЦП фирмы CAEN. Фирма CAEN выпускает широкий

ассортимент таких блоков; для наших целей подходят блоки 64-канальные V1742 и 8-канальные V1720, выполненные в стандарте VME. Блоки V1742 с частотой оцифровки 65 МГц будут использоваться для оцифровки сигналов, поступающих с ГЭУ и ГЛФД. Основной причиной выбора именно этих устройств было желание минимизировать число блоков электроники, поскольку число каналов ГЛФД и ГЭУ в сумме составит более 1 200. Для оцифровки сигналов с ФЭУ решено использовать более быстрые АЦП V1720 с частотой оцифровки 250 МГц. Помимо более точного восстановления формы сигнала они позволяют интегрировать сигнал в режиме online с помощью специального процессора, интегрированного в модуль. Это позволяет расширить критерии отбора полезных сигналов, что особенно важно по причине того, что ФЭУ будут использоваться в первой ступени триггера.

Все АЦП будут установлены в кейты стандарта VME-64, которые позволяют организовать управление модулями от компьютера. Всего потребуется 3 кейта для установки всех модулей.

Триггером (рис. 6) называется система запуска детектора, которая должна срабаты-

вать, когда в детекторе происходит интересное нас событие (например, столкновение частицы темной материи или нейтрино с ядром аргона). Поскольку такие события будут происходить очень редко, то система триггера должна быть многоуровневой. На каждой ступени будет анализироваться информация, приходящая с детектора, и по результатам анализа неинтересные события будут отбрасываться.

Первая ступень (см. рис. 6) будет собрана на основе готовых логических блоков фирмы CAEN, выполненных в стандарте NIM. Она будет анализировать сигналы, поступающие с ФЭУ и выделять те, которые приходят одновременно. Это позволит значительно подавить собственные шумы ФЭУ. Для этой цели используется целый ряд блоков: аттенюаторы N858, линии задержки N108A, дискриминаторы N841 и N843 соответственно с фиксированным и следящим порогами, смесители-разветвители N454 и N625, схема совпадений N455, блок или N113, логический блок N405, счетчики импульсов N1145, преобразователь импульсов NIM-TTL N89. Логика работы первичного триггера определяется схемой соединения блоков. Поскольку никакой дополнительной

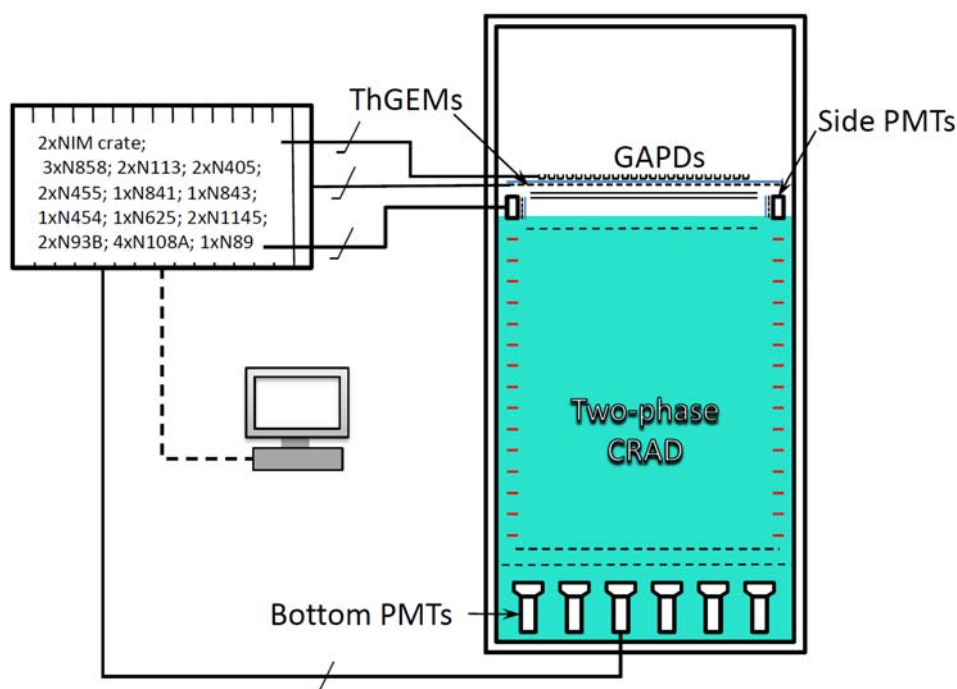


Рис. 6. Схема триггера первого уровня двухфазного КЛД с криогенной камерой объемом 160 л

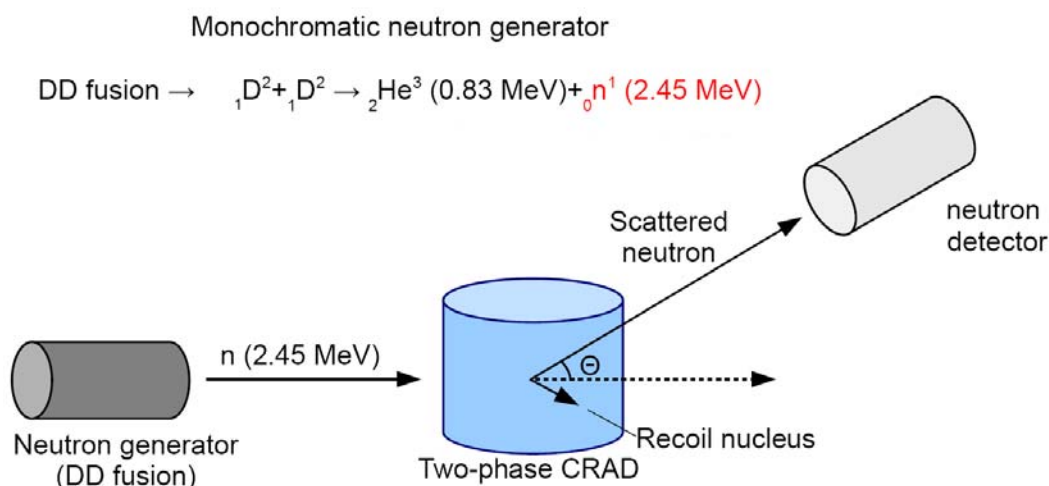


Рис. 7. Система рассеяния нейтронов для изучения отклика двухфазного КЛД на ядра отдачи

обработки сигналов на этой ступени не предусмотрено, то она будет работать максимально быстро, выдавая решение с задержкой не более 50–100 нс. По итогам работы первичного триггера принимается решение о запуске оцифровки сигналов.

На втором этапе будет анализироваться информация с АЦП с помощью спецпроцессоров, установленных в них самих. Это будет происходить также достаточно быстро, за время порядка 1 мкс.

Если событие по итогам обработки на первых двух этапах признается интересным, то оно будет передано в компьютер по каналам связи, где будет проанализировано специальной программой по усложненному алгоритму с использованием всей доступной информации. Это так называемый третичный триггер.

Если событие пройдет все критерии отбора, то оно будет записано на диск для дальнейшего анализа.

Все компоненты системы электропитания и сбора данных работают под управлением одного (или нескольких) компьютеров. Для связи между крейтами, в которых установлены электронные модули, и компьютером будут использоваться оптоволоконные кабели. Крейты NIM и система SY4527 подключаются непосредственно к компьютеру. Крейты VME будут подключаться к компьютеру через контроллеры крейта V2718 производства фирмы CAEN.

В самом компьютере для подключения оптоволоконных кабелей будет установлен

модуль A3818 также производства фирмы CAEN, позволяющий подключение четырех оптоволоконных кабелей одновременно.

Система рассеяния нейтронов. Для калибровки детектора, а именно для изучения отклика двухфазного КЛД на ядра отдачи, индуцированного рассеянием нейтронов и имитирующего сигнал от темной материи и когерентного рассеяния нейтрино на ядрах, создается система рассеяния нейтронов, аналогичная используемой в экспериментах по поиску темной материи (см. рис. 7). Она включает в себя следующие компоненты:

- нейтронный генератор D-D типа, состоящий из нейтронной трубки и мощного источника питания на 150 кВ;
- нейтронный канал, состоящий из нейтронной защиты типа водяного бака, борированного полиэтилена и коллиматоров;
- нейтронные счетчики, состоящие из твердых или жидких сцинтилляционных блоков и ФЭУ.

Для выполнения в рамках данного проекта задачи по калибровке двухфазных КЛД нужны пучки моноэнергетических нейтронов, причем в широком диапазоне энергий – от 10 кэВ до 2,5 МэВ. Разработка и создание таких уникальных пучков необходима для дальнейшего развития проекта в направлении калибровки детекторов темной материи в наиболее интересной области малых энергий ядер – менее 8 кэВ.

Для выполнения этих задач были привлечены две группы сотрудников Отделения плазмы ИЯФ. Первая группа занялась раз-

работкой и созданием генератора моноэнергетических нейтронов на основе отпаянной нейтронной трубки – с использованием D-D реакции, аналогичного показанному на рис. 7. Энергия нейтронов такого генератора равна 2,45 МэВ при характерном выходе 10^6 н/с. Вторая группа начала разрабатывать новый метод генерации моноэнергетических эпитепловых нейтронов (с энергией менее 100 кэВ) на основе протонного ускорителя и Li мишени¹.

Заключение

Представлен проект детектора предельной чувствительности на основе методики двухфазных криогенных лавинных детекторов в Ar, предназначенного для поиска темной материи и регистрации низкоэнергетических нейтрино, в частности когерентного рассеяния нейтрино на ядрах. Детектор с криогенной камерой объемом 160 л будет способен работать в режиме счета одиночных электронов первичной ионизации с рекордным (~ 1 мм) пространственным разрешением. Для достижения таких характеристик применяется оригинальный метод регистрации ионизационного сигнала в газовой фазе, а именно оптическое считывание с использованием комбинированного умножителя на основе газовых электронных умножителей и матрицы гейгеровских лавинных фотодиодов.

Представлено детальное описание как самого детектора, так и его систем, включая криогенную и вакуумную системы, системы ФЭУ, ГЭУ и ГЛФД, систему электроники (источников питания, сбора данных и триггера) и систему рассеяния нейтронов для калибровки детектора.

Список литературы

1. *Akimov D.* Detectors for Dark Matter search (Review) // *Nucl. Instrum. Meth. A.* 2009. Vol. 598. P. 275.

2. *Buzulutskov A.* Advances in Cryogenic Avalanche Detectors // *J. of Instrumentation.* 2012. Vol. 7. C02025.

3. *Chepel V., Araujo H.* Liquid Noble Gas Detectors for Low Energy Particle Physics // *J. of Instrumentation.* 2013. Vol. 8. R04001.

4. *Bernabei R. et al.* New Results from DAMA/LIBRA // *Eur. Phys. J. C.* 2010. Vol. 67. P. 39.

5. *Aalseth C. E. et al.* CoGeNT: A Search for Low-Mass Dark Matter Using p-type Point Contact Germanium Detectors // *Eprint arXiv:1208.5737.* 2012.

6. *Angloher G. et al.* Results from 730 kg Days of the CRESST-II Dark Matter Search // *Eur. Phys. J. C.* 2012. Vol. 72. P. 1971.

7. *Agnese R. et al.* Dark Matter Search Results Using the Silicon Detectors of CDMS II // *Eprint arXiv:1304.4279.* 2013.

8. *Angle J. et al.* Search for Light Dark Matter in XENON10 Data // *Phys. Rev. Lett.* 2011. Vol. 107. 051301.

9. *Aprile E. et al.* Dark Matter Results from 225 Live Days of XENON100 Data // *Phys. Rev. Lett.* 2012. Vol. 109. 181301.

10. *Akimov D. et al.* WIMP-Nucleon Cross-Section Results from the Second Science Run of ZEPLIN-III // *Phys. Lett. B.* 2012. Vol. 709. P. 14.

11. *Hagmann C., Bernstein A.* Two-Phase Emission Detector for Measuring Coherent Neutrino-Nucleus Scattering // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2004. Vol. 51. P. 2151.

12. *Akimov D. et al.* Detection of Reactor Antineutrino Coherent Scattering off Nuclei with a Two-Phase Noble Gas Detector // *J. of Instrumentation.* 2009. Vol. 4. P06010.

13. *Benetti P. et al.* First Results from a Dark Matter Search with Liquid Argon at 87 K in the Gran Sasso Underground Laboratory // *Astropart. Phys.* 2008. Vol. 28. P. 495.

14. *Lightfoot P.K. et al.* Optical Readout Tracking Detector Concept Using Secondary Scintillation from Liquid Argon Generated by a Thick Gas Electron Multiplier // *J. of Instrumentation.* 2009. Vol. 4. P04002.

15. *Bondar A. et al.* Direct Observation of Avalanche Scintillations in a THGEM-Based Two-Phase Ar Avalanche Detector Using Geiger-Mode APD // *J. of Instrumentation.* 2010. Vol. 5. P08002.

16. *Buzulutskov A. et al.* The GEM Photomultiplier Operated with Noble Gas Mixtures // *Nucl. Instrum. Meth. A.* 2000. Vol. 443. P. 164.

¹ Готовятся к печати статьи: *Бурдаков А. и др.* Система рассеяния нейтронов для изучения отклика двухфазного криогенного лавинного детектора на ядра отдачи; *Таскаев С. и др.* Нейтронные метрологические пучки для калибровки детекторов темной материи и низкоэнергетических нейтрино.

17. Bondar A. et al. A Two-Phase Argon Avalanche Detector Operated in a Single Electron Counting Mode // Nucl. Instrum. Methods. A. 2007. Vol. 574. P. 493.
18. Bondar A. et al. Thick GEM Versus thin GEM in Two-Phase Argon Avalanche Detectors // J. of Instrumentation. 2008. Vol. 3. P07001.
19. Bondar A. et al. Electron Emission Properties of Two-Phase Argon and Argon-Nitrogen Avalanche Detectors // J. of Instrumentation. 2009. Vol. 4. P09013.
20. Santos E. et al. Single Electron Emission in Two-Phase Xenon with Application to the Detection of Coherent Neutrino-Nucleus Scattering // J. High Energy Phys. 2011. Vol. 12. P. 115.
21. Badertscher A. et al. First Operation and Performance of a 200 l Double Phase LAr LEM-TPC with a $40 \times 76 \text{ cm}^2$ readout // J. of Instrumentation. 2013. Vol. 8. P04012.
22. Sauli F. GEM: A New Concept for Electron Amplification in Gas Detectors // Nucl. Instrum. Meth. A. 1997. Vol. 386. P. 531.
23. Breskin A. et al. A Concise Review on THGEM Detectors // Nucl. Instrum. Meth. A. 2009. Vol. 598. P. 107.
24. Bondar A. et al. Two-Phase Argon and Xenon Avalanche Detectors Based on Gas Electron Multipliers // Nucl. Instrum. Meth. A. 2006. Vol. 556. P. 273.
25. Bondar A. et al. On the Low-Temperature Performances of THGEM and THGEM/GAPD Multipliers in Gaseous and Two-Phase Xe // J. of Instrumentation. 2011. Vol. 6. P07008.
26. Bondar A. et al. Two-Phase Cryogenic Avalanche Detectors with THGEM and Hybrid THGEM/GEM Multipliers Operated in Ar and Ar + N₂ // J. of Instrumentation. 2013. Vol. 8. P02008.
27. Lindblom P., Solin O. Atomic Infrared Noble Gas Scintillations I. Optical Spectra // Nucl. Instrum. Meth. A. 1998. Vol. 268. P. 204.
28. Buzulutskov A., Bondar A., Grebenuk A. Infrared Scintillation Yield in Gaseous and Liquid Argon // Europhys. Lett. 2011. Vol. 94. 52001.
29. Bondar A. et al. Study of Infrared Scintillations in Gaseous and Liquid Argon. Part II: Light Yield and Possible Applications // J. of Instrumentation. 2012. Vol. 7. Paper P06014.
30. Bondar A. et al. Geiger Mode APD Performance in a Cryogenic Two-Phase Ar Avalanche Detector Based on THGEMs // Nucl. Instrum. Meth. A. 2010. Vol. 628. P. 364.
31. Bondar A. et al. First Demonstration of THGEM/GAPD-Matrix Optical Readout in Two-Phase Cryogenic Avalanche Detector in Ar // Eprint 1303.4817. 2013. Submitted to Nucl. Instrum. Meth. A.
32. Nikkel J. et al. Demonstration of Photomultiplier Tube Operation at 29 K // J. of Instrumentation. 2007. Vol. 2. P11004.
33. Monteiro C. M. B. et al. Secondary Scintillation Yield in Pure Argon Phys. Lett. B. 2008. Vol. 668. P. 167.
34. Amerio S. et al. Design, Construction and Tests of the ICARUS T600 Detector // Nucl. Instrum. Meth. A. 2004. Vol. 527. P. 329.

Материал поступил в редколлегию 14.05.2013

**A. E. Bondar, A. F. Buzulutskov, A. D. Dolgov, S. V. Peleganchuk, R. G. Snopkov
A. V. Sokolov, E. O. Shemyakina, L. I. Shekhtman**

**PROPOSAL FOR TWO-PHASE CRYOGENIC AVALANCHE DETECTOR
FOR DARK MATTER SEARCH AND LOW-ENERGY NEUTRINO DETECTION**

The proposal for the detector of ultimate sensitivity for Dark Matter search and low-energy neutrino detection, including that of coherent neutrino-nucleus scattering, is presented, based on the technique of two-phase Cryogenic Avalanche Detectors (CRADs) in Ar. Such a detector, with a 160 l cryogenic chamber, will be able to operate in single electron counting mode with superior ($\sim 1 \text{ mm}$) spatial resolution. To obtain such characteristics, a novel technique to detect ionization signal is applied, namely an optical readout using combined multiplier comprising of Gas Electron Multipliers (GEMs) and a matrix of Geiger-mode APDs (GAPDs).

Keywords: Dark Matter, coherent neutrino-nucleus scattering, two-phase Cryogenic Avalanche Detectors, Gas Electron Multipliers, Geiger-mode APDs.