

УДК 539.1.074.23; 537.563
DOI 10.25205/2541-9447-2017-12-3-5-15

А. Е. Бондарь^{1,2}, **А. Ф. Бузулуцков**^{1,2}, **А. Д. Долгов**², **В. В. Носов**^{1,2},
В. П. Олейников^{1,2}, **А. В. Соколов**^{1,2}, **Е. А. Фролов**^{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.O.Shemyakina@inp.nsk.su

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В ДВУХФАЗНОМ АРГОНЕ *

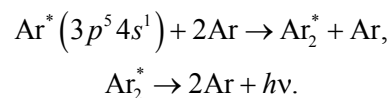
Изучена пропорциональная электролюминесценция в двухфазном аргоне с небольшой (9 ppm) примесью азота. Был подтвержден эффект увеличения выхода электролюминесценции и наличие УФ компоненты в дополнение к ВУФ в пропорциональной электролюминесценции в двухфазном Ar. С другой стороны, вклад УФ компоненты оказался недостаточным для объяснения эффекта увеличения выхода электролюминесценции. Полученные результаты актуальны для развития детекторов темной материи и низкоэнергетических нейтрино.

Ключевые слова: детекторы темной материи, электролюминесценция в благородных газах, двухфазный аргон с примесью азота, двухфазные криогенные лавинные детекторы.

Введение

Исследование пропорциональной электролюминесценции (ЭЛ) в двухфазном аргоне актуально в области развития детекторов на основе жидких благородных газов для поиска темной материи [1] и экспериментов по регистрации когерентного рассеяния нейтрино на ядрах [2; 3]. В двухфазных детекторах сигнал S2 (индуцированный первичной ионизацией в жидкости благородного газа) детектируется посредством эффекта пропорциональной ЭЛ (или вторичной сцинтилляции) в электролюминесцентном зазоре, расположенном непосредственно над границей раздела фаз [4]. В пропорцио-

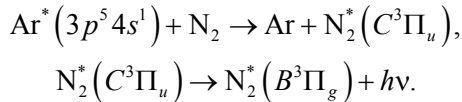
нальной ЭЛ энергия, сообщаемая электрическим полем электронам, почти полностью расходуется на возбуждение атомов аргона до состояний $Ar^*(3p^5 4s^1)$. В результате тройных столкновений этих возбужденных атомов с атомами Ar происходит рождение эксимеров (Ar_2^*), которые, распадаясь, излучают фотоны в вакуумном ультрафиолете (ВУФ) с длиной волны около 128 нм (см. [5] и ссылки на литературу):



* Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 15-02-01821).

Бондарь А. Е., Бузулуцков А. Ф., Долгов А. Д., Носов В. В., Олейников В. П., Соколов А. В., Фролов Е. А., Шемякина Е. О., Шехтман Л. И. Исследование пропорциональной электролюминесценции в двухфазном аргоне // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12, № 3. С. 5–15.

В присутствии примеси азота к газообразному аргону механизм ЭЛ может измениться за счет передачи возбуждения от $\text{Ag}^*(3p^5 4s^1)$ молекуле N_2 с образованием возбужденной молекулы $\text{N}_2^*(C^3\Pi_u)$, которая впоследствии излучает в ближнем ультрафиолете (УФ) в диапазоне 310–430 нм (так называемый второй положительный континуум, 2PS) [5]:



Такое преобразование ВУФ в УФ, происходящее непосредственно в среде детектора, существенно повысило бы эффективность сбора фотонов сигнала ЭЛ (S2) за счет устранения проблем с переизлучением и потерями на полное внутреннее отражение в пленке сместителя спектра (WLS), который необходимо использовать в случае регистрации ВУФ. Известно, что в газообразном аргоне при комнатной температуре такое преобразование электролюминесценции из ВУФ в УФ происходит при относительно большом содержании азота 0,2–2 % [6–8].

Пропорциональная ЭЛ в ВУФ в газообразном Ag при криогенных температурах в двухфазном режиме недавно впервые была исследована [9; 10]: был измерен ЭЛ выход в Ag с малой (~ 50 ppm) концентрацией примеси N_2 , которая может быть типичной для крупномасштабных экспериментов на основе жидкого Ag . Измеренный нами ЭЛ выход оказался значительно выше (в 2,7 раза) по сравнению с измеренным при комнатной температуре [11] и с ожидаемым теоретически [12]. Это увеличение объяснялось гипотезой о том, что 50 % испущенных фотонов были вызваны излучением N_2 в ближнем УФ (через механизм 2PS). Часть такого излучения считалась зарегистрированной напрямую, т. е. избежавшей переизлучения в пленке WLS и, следовательно, имеющей значительно более высокую эффективность сбора фотонов.

Из этой гипотезы следует, что вероятность передачи возбуждения от Ag к N_2 существенно увеличивается при 87 К по сравнению с комнатной температурой. С другой стороны, выполненный недавно в [5] всесторонний анализ уровней энергии, спектров излучения и констант скоростей реак-

ций в двухфазном Ag с примесью N_2 склоняет нас к мысли о том, что эта гипотеза вряд ли может быть справедливой при таком малом содержании N_2 , а это значит, что экспериментальные данные в работе [9] были неверно интерпретированы.

В данной работе мы попытаемся обозначить проблему, в частности воспроизвести экспериментальные результаты [9] и понять проблему пропорциональной электролюминесценции в двухфазном Ag .

Настоящее исследование было выполнено в ходе разработки двухфазных криогенных лавинных детекторов (КЛД) предельной чувствительности для экспериментов по регистрации редких событий [13–19].

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка была аналогична установке, использованной в наших предыдущих измерениях в 2015 г. [9; 10] (рис. 1). Она представляет собой двухфазный КЛД с криогенной камерой объемом 9 л, содержащей 2,5 л жидкого Ag с незначительной (9 ppm) примесью N_2 . Для приготовления смеси использовался Ag марки 5.8 с заявленной производителем общей долей примесей не более 2 ppm, из которых 0,5 и 0,8 ppm приходится на O_2 и N_2 соответственно. Таким образом, доля других примесей составляла менее 1 ppm, что исключало их влияние на результаты измерений. Во время каждой процедуры охлаждения Ag очищался от электроотрицательных примесей с помощью фильтра Oxisorb, что обеспечивало время жизни электрона в жидкости более 100 мкс [10]. Детектор работал в двухфазном режиме в равновесном состоянии при давлении насыщенных паров $1,000 \pm 0,003$ атм и температуре 87,3 К.

Криогенная камера содержала катод, два полеформирующих электрода и толстый газовый электронный умножитель (ТГЭУ, на рис. 1 THGEM0), погруженные в слой жидкого Ag толщиной 55 мм. Эти четыре элемента образовывали дрейфовый промежуток в жидком Ag длиной 48 мм. Слой жидкого Ag толщиной 4 мм над THGEM0 работал как область электронной эмиссии. Напряжение на электроды подавалось через высоковольтный делитель, расположенный в жидкости. В газовой фазе над жидкостью располагался двухкаскадный ТГЭУ (на рис. 1

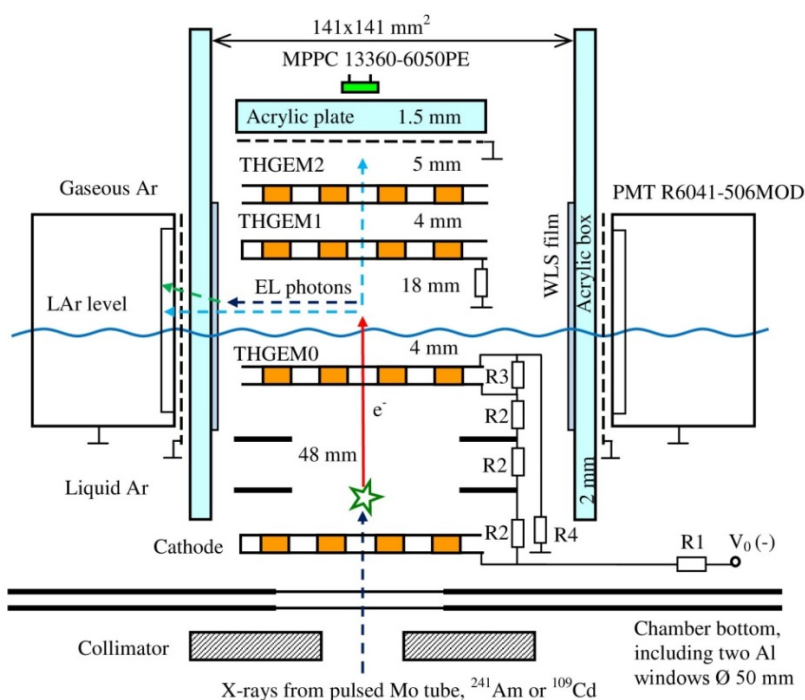


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (не в масштабе)
Сопровителения делителя R1, R2, R3 и R4 равны 80, 40, 4 и 600 МΩ соответственно

THGEM1 и THGEM2). Поверхность жидкости и нижняя обкладка THGEM1 образовывали ЭЛ зазор толщиной 18 мм. При этом THGEM1 был заземлен через резистор и выступал в качестве анода зазора. Все электроды имели одинаковую активную площадь $10 \times 10 \text{ см}^2$. Напряжение, приложенное к делителю, варьировалось от 11 до 22 кВ, создавая в жидком Ar электрическое дрейфовое поле 0,34–0,68 кВ/см, эмиссионное поле 2,6–5,1 кВ/см и поле в ЭЛ зазоре 4,0–8,0 кВ/см. Среднее время дрейфа электронов через дрейфовый, эмиссионный и ЭЛ промежутки варьировалось от 25 до 35 мкс, в зависимости от приложенных электрических полей.

ЭЛ зазор просматривался четырьмя компактными двухдюймовыми ФЭУ R6041-506MOD [17; 19] (на рис. 1 PMT), расположенными по периметру зазора. Для предотвращения разрядов и проникновения поля из ЭЛ зазора ФЭУ были электрически изолированы заземленной сеткой и коробом из органического стекла (полиметилметакрилат, ПММА). На внутреннюю поверхность короба, обращенную к ЭЛ зазору, перед ка-

ждым ФЭУ были нанесены пленки WLS на основе тетрафенилбутадиена (ТРВ) в полистирольной матрице [20; 21], чтобы сделать ФЭУ чувствительными к излучению чистого Ag в ВУФ. Кроме того, ЭЛ зазор просматривался через ПММА пластину и двухкаскадный ТГЭУ кремниевым фотодиодом (SiPM или MPPC) со спектральной чувствительностью в диапазоне от ближнего УФ (360 нм) до ближней ИК-области (1 000 нм) (рис. 2).

Чтобы проверить воспроизводимость результатов, мы сделали две важные модификации установки по сравнению с [9; 10], заменив те элементы сборки, которые могли бы наиболее сильно повлиять на точность измерений ЭЛ выхода. Во-первых, мы полностью заменили систему ФЭУ, включая сами ФЭУ и ПММА короб с пленкой WLS. Во-вторых, мы заменили MPPC, используемые в [9; 10] на 13360-6050PE¹, имеющие в 4 раза большую активную область ($6 \times 6 \text{ мм}^2$) и лучшие характеристики при

¹ <http://www.hamamatsu.com>

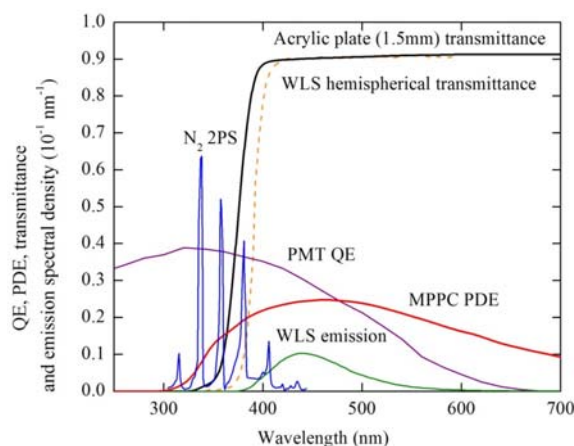


Рис. 2. Квантовая эффективность (QE) ФЭУ R6041-506MOD при 87 К, полученная из [24] с использованием температурной зависимости; эффективность регистрации фотона (PDE) MPPC 13360-6050PE при относительном перенапряжении 0,0387, полученная из [16] с использованием зависимости PDE от напряжения; пропускание ПММА пластины толщиной 1,5 мм, расположенной перед MPPC, измеренное нами; полусферический коэффициент пропускания WLS (TPB в полистироле) [21]. Показан также спектр излучения Ag с примесью N₂ (0,2 %) в ближнем УФ и видимой области, измеренный при комнатной температуре и высоким (~1 атм) давлении [7] и спектр излучения WLS [20]

криогенных температурах, в частности более высокий коэффициент усиления и меньшие перекрестные наводки. На MPPC подавалось напряжение смещения, равное 44 В, что, принимая во внимание измеренное нами пробойное напряжение, которое составило 42,4 В, соответствовало относительно перенапряжению 0,0387.

В дополнение к этим модификациям мы применили новый метод измерения концентрации N₂ в Ag, а именно метод атомно-эмиссионной спектроскопии, с помощью газоанализатора «СВЕТ»², в отличие от [9; 10], где использовался метод анализа состава остаточных газов с помощью масс-спектрометра. Аналогично [9; 10] концентрация N₂ измерялась в газе, содержащемся в баллоне из нержавеющей стали, из которого газ сжижался в криогенную камеру перед измерением и в который собирался обратно после захода (путем охлаждения баллона жидким азотом). Измеренная таким образом

концентрация N₂ составила 9 ± 3 ppm, что соответствовало концентрации в двухфазном режиме около 9 ppm в жидкости и 24 ppm в газовой фазе (согласно закону Рауля).

Детектор облучался снаружи через коллиматор и два алюминиевых окна (каждое толщиной 1 мм) рентгеновскими фотонами от импульсной рентгеновской трубки с молибденовым анодом, работающей при напряжении 40 кВ (с частотой 240 Гц) [18]. Рентгеновский импульс был достаточно сильным, чтобы обеспечить измеряемый заряд ионизации в ЭЛ зазоре (десятки тысяч электронов) и достаточно быстрым (0,5 мкс), чтобы обеспечить разумное временное разрешение.

Три типа сигналов регистрировались с ЭЛ зазора: оптический сигнал с ФЭУ, зарядовый сигнал с THGEM1, действующего как анод ЭЛ зазора, и оптический сигнал с MPPC (рис. 3). Оптические сигналы с четырех ФЭУ линейно суммировались с использованием блока CAEN N625, затем усиливались линейным усилителем со временем формирования 200 нс. Зарядовые сигналы с THGEM1 регистрировались с использованием зарядочувствительного усилителя и усилителя-формирователя с общей постоянной времени 1 мкс. Оптические сигналы с MPPC регистрировались с использованием быстрого усилителя со временем формирования 40 нс.

Амплитуда сигнала с ФЭУ выражалась в числе фотоэлектронов (*pe*) путем деления площади импульса, измеренной в выбранной части («zoom» импульса ФЭУ на рис. 3), на площадь соответствующей части импульса одного фотоэлектрона, которая была определена в специальных измерениях с использованием шумовых сигналов (рис. 4, слева) и зависимости усиления ФЭУ от напряжения (рис. 4, справа).

Амплитуда сигнала THGEM1 выражалась в числе электронов путем измерения площади импульса в выбранной его части («zoom» импульса THGEM1 на рис. 3), с использованием калибровки усилителя. Процедура калибровки усилителя включала в себя инжекцию заряда с помощью точной емкости и генератора импульсов.

Сигнал MPPC был существенно биполярным, что отражало характерный отклик быстрого усилителя. Соответственно, для корректного определения амплитуды сигнала нам пришлось применить двойное интегри-

² Experimental Design Bureau of Automation. URL: <http://www.okba.ru/eng/produce/gasanalyzers/svet.php>

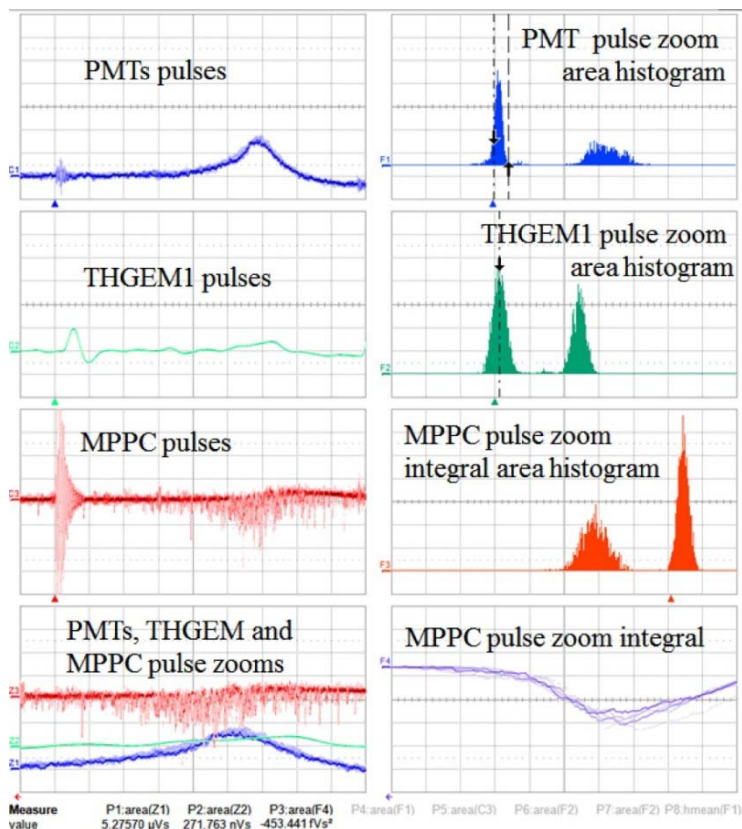


Рис. 3. Типичные сигналы с ЭЛ зазора при облучении детектора рентгеновскими фотонами при электрическом поле 6,84 кВ/см в ЭЛ зазоре и 0,59 кВ/см в дрейфовом промежутке. Слева: суммарный оптический сигнал с четырех ФЭУ, зарядовый сигнал с анода ЭЛ зазора (THGEM1) и оптический сигнал с MPPC. Справа: амплитудные распределения сигналов с ФЭУ и THGEM1 (интеграл импульса по времени или площадь импульса), и MPPC (двойной интеграл импульса по времени), а также спектры шумов электроники

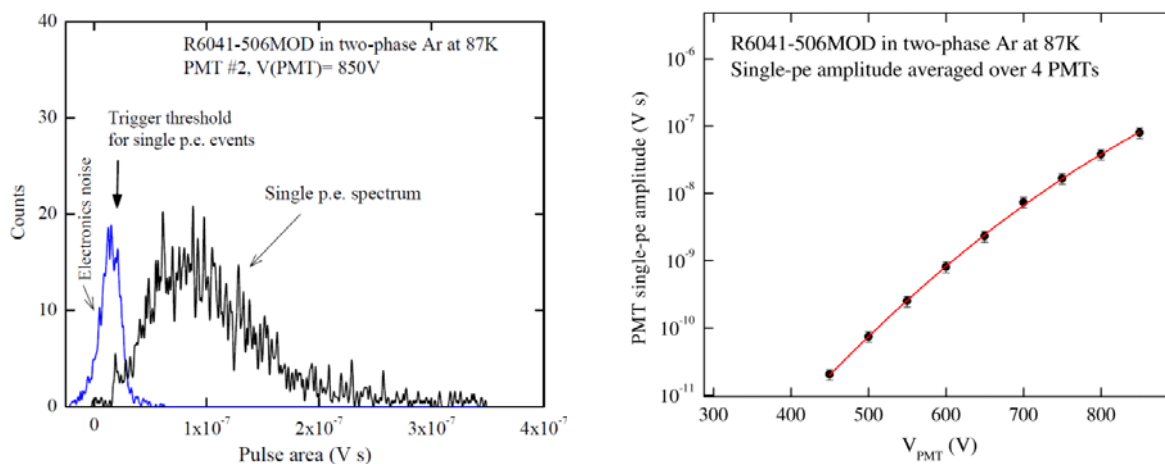


Рис. 4. Амплитудное распределение шумовых (однофотоэлектронных) сигналов одного из ФЭУ; показан также спектр шумов электроники (слева). Усиленная характеристика, усредненная по четырем ФЭУ: усредненная амплитуда одного фотоэлектрона в зависимости от напряжения, приложенного к делителю ФЭУ (справа)

рование по времени, так как простой интеграл по времени стремится к нулю в данных временных масштабах (5 мкс/деление), см. рис. 3. Этот метод позволил оценить полные амплитуды длинных сигналов МРРС, состоящих из нескольких коротких однофотонных импульсов, разделенных во времени (подробнее об этом см. в [23]). Типичный пример такого сигнала показан на рис. 3. С другой стороны, в этом методе выражение амплитуды МРРС в числе фотоэлектронов оказывается сложной задачей, так как амплитуду одного фотоэлектрона на таком большом масштабе времени определить нелегко: из-за флуктуаций нулевого уровня на больших временных масштабах однофотонные пики становились неразличимыми.

В предыдущей работе [9] мы измеряли амплитуду одного фотоэлектрона за гораздо более короткое время интегрирования, чем использованное при измерениях ЭЛ выхода. Таким образом, амплитуда одного фотоэлектрона была существенно занижена. Это привело к завышению амплитуды МРРС, а следовательно, к завышению вклада компоненты излучения N_2 за счет 2PS в общий ЭЛ выход, как будет показано далее.

Чтобы преодолеть эту проблему, мы экстраполировали амплитуду одного фотоэлектрона, измеренную за короткое время, на более длинную временную шкалу. Однако эта процедура не была точной. В данной работе мы применили улучшенную процедуру, чтобы связать амплитуду сигнала МРРС с числом фотоэлектронов. В этой процедуре, выполняемой в режиме off-line, мы напрямую подсчитали число фотоэлектронов в сигналах на ограниченном наборе данных и связали его с измеренной амплитудой.

Чувствительность двухфазного детектора с ЭЛ зазором характеризуется выходом ЭЛ зазора. В нашем случае он может быть определен как число фотоэлектронов, зарегистрированных ФЭУ или МРРС (N_{pe}), на один электрон в ЭЛ зазоре: $Y_{gap} = N_{pe} / N_e$, где N_e – заряд, выраженный в числе электронов, дрейфующих в ЭЛ зазоре и вызывающих пропорциональную электролюминесценцию.

На рис. 2. представлены оптические спектры квантовой эффективности (QE) ФЭУ [22], эффективности регистрации фотона

(PDE) МРРС 6050PE при относительном перенапряжении 0,0387, полученная из [16] с использованием зависимости PDE от напряжения, коэффициент пропускания ПММА пластинки (измеренный нами) и полусферический коэффициент пропускания WLS (TPB в полистироле) [21]. Кроме того, приведен спектр излучения Ar с примесью N_2 , а именно спектр 2PS [7], и спектр излучения WLS [20]. Эти данные были использованы для определения абсолютного ЭЛ выхода.

Абсолютный ЭЛ выход определяется как количество испускаемых фотонов (N_{ph}), нормированное на число дрейфующих электронов, производящих электролюминесценцию, и на длину дрейфа электронов (d):

$$Y_{EL} = N_{ph} / N_e / d.$$

Количество фотонов, зарегистрированных ФЭУ или МРРС, определяется как

$$N_{ph} = N_{pe} / PCE,$$

где PCE – эффективность конверсии фотона в фотоэлектрон. Для ФЭУ

$$PCE = \varepsilon \langle CE \rangle \langle QE \rangle$$

для ВУФ и УФ компонент, переизлученных WLS, и

$$PCE = \varepsilon \langle QE \rangle$$

для УФ компоненты, регистрируемой напрямую. Для МРРС

$$PCE = \varepsilon \langle PDE \rangle.$$

Здесь ε – эффективность сбора фотонов, $\langle CE \rangle$ – эффективность конверсии WLS, усредненная по спектру излучения ВУФ (чистый Ar) или УФ (N_2 2PS); $\langle QE \rangle$ и $\langle PDE \rangle$ – квантовая эффективность (QE) ФЭУ и эффективность регистрации фотона (PDE) МРРС, усредненные по спектру излучения N_2 или WLS и соответствующим образом свернутые с полусферическим коэффициентом пропускания WLS или с коэффициентом пропускания ПММА пластины (см. рис. 2). В частности, значение QE ФЭУ, усредненной по спектру излучения WLS, составляет 26,6 %, значение QE ФЭУ, усредненной по спектру излучения N_2 и свернутой с полусферическим коэффициентом пропускания WLS, составляет 5,1 %, а значение PDE МРРС, усредненной по спектру излучения N_2 и свернутой с коэффициентом пропускания ПММА пластины, составляет 6,4 %. Кроме того, мы использо-

вали $\langle CE \rangle = 0,58$ около 128 нм [21], $\langle CE \rangle = 0,40$ при 300–400 нм [20; 21; 24] и $\langle CE \rangle = 0$ выше 400 нм.

Для расчета эффективности сбора фотонов были проведены четыре моделирования методом Монте-Карло. Первое и второе касались излучения фотонов в ЭЛ зазоре в ВУФ (Ag, 128 нм) или УФ (N₂ 2PS), поглощенных WLS. Доля УФ фотонов, поглощенных WLS (300–400 нм), составила 85 %. Это значение было получено сверткой спектра излучения N₂ в модели 2PS и спектра полусферической прозрачности WLS (см. рис. 2). Моделирование описывало процессы распространения фотонов до WLS, их преобразование в фотоны видимого света и их дальнейшее распространение на фотокатоды ФЭУ.

Третья процедура моделирования описывала излучение УФ (N₂ 2PS) фотонов, избежавших поглощения в WLS (400–450 нм) и, таким образом, зарегистрированных ФЭУ напрямую. Их доля составила 15 %. Эффективность конверсии фотона в фотоэлектрон для этой компоненты оказалась значительно

выше (примерно в 20 раз), чем для света, переизлученного WLS, из-за отсутствия потерь на переизлучение и полное внутреннее отражение.

Четвертая процедура имитировала излучение УФ (N₂ 2PS) фотонов и их распространение на МРРС через двухкаскадный ТГЭУ, защитную сетку и ПММА пластину. Доля фотонов, прошедших через ПММА пластину (360–450 нм), составила 31 % от УФ (N₂ 2PS) фотонов.

Из-за критической зависимости абсолютного ЭЛ выхода от результатов моделирования оно выполнялось двумя способами с использованием различных программных кодов: разработанного нами и с использованием средств трассировки фотонов пакета программного обеспечения Geant4. Результаты обоих способов согласуются в пределах 20 %, что было включено в систематическую ошибку. Результаты этих процедур моделирования представлены в таблице, где показаны значения ϵ , $\langle QE \rangle$, $\langle PDE \rangle$ и PCE для соответствующих компонент излучения. Другие детали экспериментальной установки были описаны в работах [9; 10].

Эффективность сбора фотонов (ϵ), рассчитанная для различных компонент излучения; эффективность конверсии WLS ($\langle CE \rangle$), усредненная по спектру излучения в ВУФ (чистый Ag) или УФ (N₂ 2PS); квантовая эффективность ФЭУ ($\langle QE \rangle$) или эффективность регистрации фотонов МРРС ($\langle PDE \rangle$), усредненные по спектру излучения WLS или N₂ 2PS и соответствующим образом свернутые со спектром пропускания WLS или ПММА пластины; а также результирующая эффективность конверсии фотона в фотоэлектрон (PCE)

Компонента эмиссии	Фотодетектор	ϵ	$\langle CE \rangle$	$\langle QE \rangle$ или $\langle PDE \rangle$	PCE
ВУФ, 128 нм (чистый Ag), переизлученный	4 ФЭУ	0,0052	0,58	0,266	$8,0 \times 10^{-4}$
УФ, 300-450 нм (N ₂ 2PS), переизлученный	4 ФЭУ	0,0061	0,34	0,266	$5,5 \times 10^{-4}$
УФ, 300-450 нм (N ₂ 2PS), зарегистрированный напрямую	4 ФЭУ	0,052	–	0,051	$2,7 \times 10^{-3}$
УФ, 300-450 нм (N ₂ 2PS), зарегистрированный напрямую	МРРС	0,00032	–	0,064	$2,0 \times 10^{-5}$

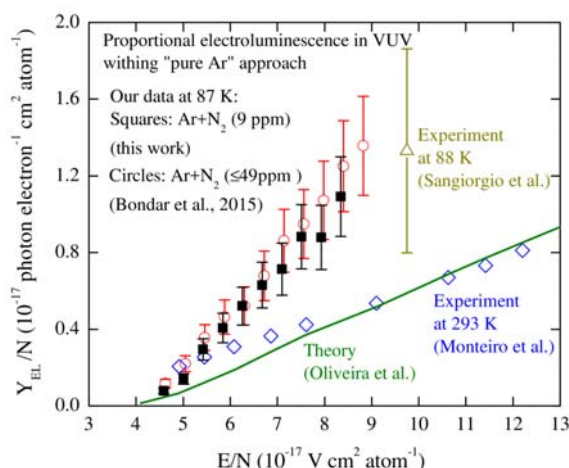


Рис. 5. Приведенный ЭЛ выход в ВУФ в зависимости от приведенного электрического поля, полученный в двухфазном Ar в модели «чистого Ar». Показаны данные настоящей работы, полученные в 2016 г. в Ar + N₂ (~ 9 ppm), и данные, полученные нами в 2015 г. в Ar + N₂ (< 49 ppm) (Bondar et al. [9]), а также точка данных, выведенная из работы Sangiorgio et al. [25], полученная в чистом Ar. Для сравнения приведен ЭЛ выход в газообразном Ar в ВУФ, полученный экспериментально при 293 К (Monteiro et al. [11]) и теоретически (Oliveira et al. [12])

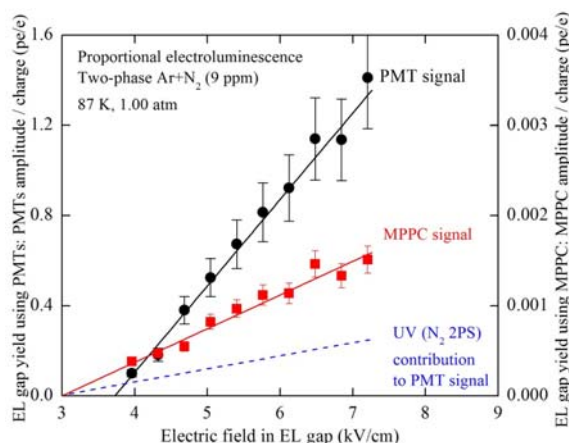


Рис. 6. Выход ЭЛ зазора, измеренный с использованием ФЭУ (левая шкала) и МРРС (правая шкала), в зависимости от электрического поля в ЭЛ зазоре. Пунктирная линия показывает вклад пропорциональной электролюминесценции в УФ в модели «Ar + N₂» (т. е. из-за излучения N₂ 2PS) в сигнал ФЭУ, полученный из ЭЛ выхода, измеренного с помощью МРРС

Экспериментальные результаты

В предыдущей статье [9] два наблюдения побудили нас выдвинуть гипотезу об усилении электролюминесценции в двухфазном Ar в модели излучения N₂ 2PS. Первое связано с превышением ЭЛ выхода по сравнению с ожидаемым теоретически в 2,7 раза в

модели «чистого Ar», т. е. когда излучение фотонов полностью связано с излучением Ar₂^{*} в ВУФ. Второе наблюдение связано с наличием сигнала на МРРС, прямо указывающего на существование компоненты излучения в видимой области или в УФ (см. рис. 2 для справки по спектру).

Первое наблюдение, т. е. модель «чистого Ar», иллюстрируется рис. 5, демонстрирующим приведенный ЭЛ выход (Y_{EL}/N) как функцию приведенного электрического поля (E/N). С одной стороны, можно видеть, что данные настоящей работы полностью подтверждают результат нашей предыдущей работы: ЭЛ выход в двухфазном Ar существенно выше (в 2–3 раза) по сравнению с предсказанным теорией и измеренным при комнатной температуре. С другой стороны, существует значительная разница в содержании N₂ между настоящими данными (2016 г.) и предыдущими (2015 г.): 9 против 49 ppm. Этот факт указывает на то, что эффект усиления может быть не связан с присутствием примеси N₂ в противоположность предположению, принятому в [9]. Последний вывод также подтверждается точкой данных другой группы (выведенной нами из работы [25]), полученной для чистого Ar и показанной на рис. 5.

Второе наблюдение иллюстрируется рис. 6, показывающим величину выхода ЭЛ зазора, измеренную с помощью ФЭУ и МРРС. С одной стороны, мы подтверждаем здесь наличие сигнала на МРРС, наблюдаемого в нашей предыдущей работе [9], следовательно, подтверждаем существование излучения вне области ВУФ. Чтобы продвинуться вперед, мы должны принять определенную модель для этой компоненты. Исчерпывающее описание источников излучения вне области ВУФ в двухфазном Ar с примесью N₂ и Xe, можно найти в работе [5], где представлен всесторонний анализ уровней энергии, полос излучения и констант скоростей реакций. В области чувствительности ФЭУ все такие источники связаны с излучением за счет примеси N₂, а именно с 2PS или 1PS (первый положительный континуум) вследствие N₂^{*}(C) или N₂^{*}(B) соответственно. Первый источник является предпочтительным согласно анализу кинетики реакции. Кроме того, 1PS производит излучение в ближнем инфра-

красном диапазоне, а нами ранее было показано, что электролюминесценция в ближнем ИК начинается при гораздо более высоких полях [14]. При отсутствии других рациональных предположений мы принимаем здесь гипотезу о происхождении излучения вне области ВУФ в модели излучения N_2 2PS аналогично [9].

С другой стороны, когда мы оценили вклад этой УФ (N_2 2PS) компоненты в сигнал ФЭУ, он оказался в 6 раз меньше, чем указано в [9] (см. рис. 6). Мы считаем, что это несоответствие обусловлено тем, что амплитуда одиночного фотоэлектрона МРРС в нашей предыдущей работе [9] была существенно недооценена, что привело к завышенной амплитуде МРРС, как обсуждалось в предыдущем разделе. Соответственно вклад УФ составляет только 19 %, а остальная часть сигнала ФЭУ относится к ВУФ.

На рис. 7 показан приведенный ЭЛ выход в двухфазном Аг, полученный в модели «Ag + N₂», т. е. в ВУФ и УФ, в предположении, что УФ компонента (зарегистрированная МРРС) обусловлена излучением N_2 2PS. При таком подходе расхождение полученных данных с теорией все еще остается весьма значительным, примерно в два раза.

Линейные зависимости ЭЛ выхода в ВУФ (за счет эксимеров Ag_2^*) и в УФ (N_2^* 2PS) от электрического поля (см. рис. 7) описываются следующими уравнениями:

$$Y_{EL}/N = 0,219 E/N - 0,976,$$

$$Y_{EL}/N = 0,010 E/N - 0,033.$$

Наклоны прямых определяют параметр усиления пропорциональной электролюминесценции. Он составляет 219 ± 13 и 10 ± 1 фотонов на киловольт в ВУФ и УФ соответственно.

Мы можем заключить, что вклад УФ компоненты недостаточен для объяснения эффекта усиления сигнала ФЭУ в отличие от [9] и в соответствии с теоретическим анализом [5]. В результате ситуация с интерпретацией данных становится еще более запутанной, чем в предыдущей работе [9]. Таким образом, мы не можем объяснить следующие два момента в пропорциональной электролюминесценции в двухфазном Аг: увеличенный ЭЛ выход в ВУФ и происхождение излучения в УФ.

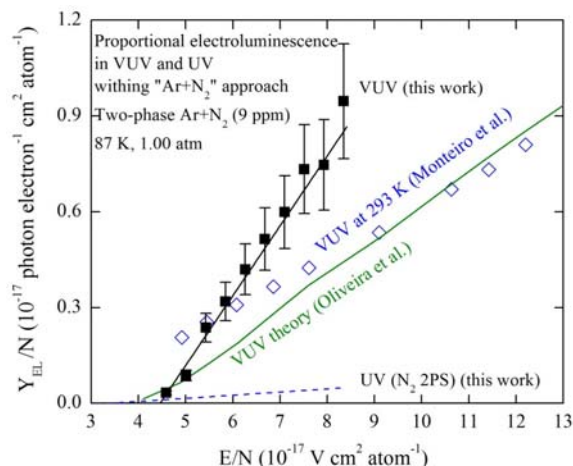


Рис. 7. Приведенный ЭЛ выход в ВУФ и УФ в зависимости от приведенного электрического поля, полученный в данной работе в модели «Ag + N₂». Для сравнения приведены данные для выхода в газообразном Аг в ВУФ, полученные экспериментально при 293 К (Monteiro et al. [11]) и теоретически (Oliveira et al. [12])

Заключение

В данной работе мы продолжили изучать проблему пропорциональной электролюминесценции в двухфазном Аг с примесью N_2 . С одной стороны, результаты настоящей работы подтверждают эффект увеличения ЭЛ выхода в двухфазном Аг, наблюдавшийся в [9]. Мы также подтверждаем наличие УФ компоненты в дополнение к ВУФ в пропорциональной электролюминесценции. С другой стороны, вклад УФ компоненты, определенный в рамках модели излучения N_2 2PS, оказался недостаточным для объяснения эффекта увеличения ЭЛ выхода, в отличие от [9] и в соответствии с теоретическим анализом [5].

Таким образом, данное исследование помогло нам определить проблему: на данный момент мы не можем объяснить механизм пропорциональной электролюминесценции в двухфазном Аг. Эта задача должна быть решена в будущих исследованиях.

Список литературы

1. Alexander T. et al. First results from the DarkSide-50 dark matter experiment at Laboratori Nazionali del Gran Sasso // Phys. Lett. B. 2015. Vol. 743. P. 456.

2. *Hagmann C., Bernstein A.* Two-phase emission detector for measuring coherent neutrino-nucleus scattering // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2004. Vol. 51. P. 2151.
3. *Akimov D. et al.* Detection of reactor antineutrino coherent scattering off nuclei with a two-phase noble gas detector // *JINST.* 2009. Vol. 4. P06010.
4. *Chepel V., Araujo H.* Liquid noble gas detectors for low energy particle physics // *JINST.* 2013. Vol. 8. R04001.
5. *Buzulutskov A.* Photon emission and atomic collision processes in two-phase argon doped with xenon and nitrogen // *Europhys. Lett.* 2017. Vol. 117. P. 39002
6. *Polcarpo A. J. P. L. et al.* The argon-nitrogen proportional scintillation counter // *Nucl. Instr. Meth.* 1967. Vol. 55. P. 105.
7. *Takahashi T. et al.* Emission spectra from Ar-Xe, Ar-Kr, Ar-N₂, Ar-CH₄, Ar-CO₂ and Xe-N₂ gas scintillation proportional counters // *Nucl. Instr. Meth.* 1983. Vol. 205. P. 591.
8. *Kazkaz K. et al.* Operation of a 1-liter-volume gaseous argon proportional scintillation counter // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2010. Vol. 621. P. 267.
9. *Bondar A. et al.* Proportional electroluminescence in two-phase argon and its relevance to rare-event experiments // *Europhys. Lett.* 2015. Vol. 112. P. 19001.
10. *Bondar A. et al.* Two-phase Cryogenic Avalanche Detector with electroluminescence gap operated in argon doped with nitrogen // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2017. Vol. 845. P. 206.
11. *Monteiro C. M. B. et al.* Secondary scintillation yield in pure argon // *Phys. Lett. B.* 2008 Vol. 668. P. 167.
12. *Oliveira C. A. B. et al.* A simulation toolkit for electroluminescence assessment in rare event experiments // *Phys. Lett. B.* 2011. Vol. 703. P. 217.
13. *Buzulutskov A.* Advances in Cryogenic Avalanche Detectors // *JINST.* 2012. Vol. 7. C02025.
14. *Bondar A. et al.* Study of infrared scintillations in gaseous and liquid argon. Part II: light yield and possible applications // *JINST.* 2012. Vol. 7. P06014.
15. *Bondar A. et al.* Measurement of the ionization yield of nuclear recoils in liquid argon at 80 and 233 keV // *Europhys. Lett.* 2014. Vol. 108. P. 12001.
16. *Otte A. N. et al.* Characterization of three high efficiency and blue sensitive silicon photomultipliers // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2017. Vol. 846. P 106–125.
17. *Bondar A. et al.* Characterization of photo-multiplier tubes for the Cryogenic Avalanche Detector // *JINST* 2015. Vol. 10. P10010.
18. *Bondar A. et al.* X-ray ionization yields and energy spectra in liquid argon // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2016 Vol. 816 P. 119.
19. *Bondar A. et al.* Study of cryogenic photomultiplier tubes for the future two-phase cryogenic avalanche detector // *JINST.* 2017. Vol. 12. C05002.
20. *Francini R. et al.* Tetraphenyl-butadiene films: VUV-Vis optical characterization from room to liquid argon temperature // *JINST.* 2013. Vol. 8. C09010.
21. *Gehman V. M. et al.* Characterization of protonated and deuterated tetra-phenyl butadiene film in a polystyrene matrix // *JINST.* 2013. Vol. 8. P04024.
22. *Lyashenko A. et al.* Measurement of the absolute Quantum Efficiency of Hamamatsu model R11410-10 photomultiplier tubes at low temperatures down to liquid xenon boiling point // *JINST.* 2014. Vol. 9. P11021.
23. *Bondar A. et al.* Direct observation of avalanche scintillations in a THGEM-based two-phase Ar avalanche detector using Geiger-mode APD // *JINST.* 2010. Vol. 5. P08002.
24. *Lally C. H. et al.* UV quantum efficiencies of organic fluors // *Nucl. Instr. Meth. B.* 1996. Vol. 117. P. 421.
25. *Sangiorgio S. et al.* First demonstration of a sub-keV electron recoil energy threshold in a liquid argon ionization chamber // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2013. Vol. 728. P. 69.

A. E. Bondar^{1,2}, **A. F. Buzulutskov**^{1,2}, **A. D. Dolgov**², **V. V. Nosov**^{1,2}, **V. P. Oleynikov**^{1,2}
A. V. Sokolov^{1,2}, **E. A. Frolov**^{1,2}, **E. O. Shemyakina**^{1,2}, **L. I. Shekhtman**^{1,2}

¹*Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS
11 Acad. Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

²*Novosibirsk State University
2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

E.O.Shemyakina@inp.nsk.su

STUDY OF PROPORTIONAL ELECTROLYUMINESCENCE IN TWO-PHASE ARGON

In this work proportional electroluminescence (EL) in gaseous argon with a minor (9 ppm) admixture of nitrogen has been studied. The effect of enhancement of the EL yield and the presence of a UV component in proportional electroluminescence in two-phase Ar were confirmed. On the other hand, the effect of EL yield enhancement can not be explained by a UV contribution. The results obtained are relevant in the field of noble-gas liquid detectors for dark matter search and low-energy neutrino experiments.

Keywords: Dark Matter detectors, proportional electroluminescence in noble gases, two-phase Ar doped with N₂, two-phase Cryogenic Avalanche Detectors.