

УДК 539.1.074.23, 537.531.2

## ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА НЕЙТРАЛАХ НА РАБОТУ ДВУХФАЗНЫХ ДЕТЕКТОРОВ НА АРГОНЕ

А. Е. Бондарь<sup>1,2</sup>, Е. О. Борисова<sup>1,2</sup>, А. Ф. Бузулуцков<sup>1,2</sup>, В. В. Носов<sup>1,2</sup>,  
В. П. Олейников<sup>1,2</sup>, А. В. Соколов<sup>1,2</sup>, Е. А. Фролов<sup>1,2</sup>

*Двухфазные детекторы на основе жидких благородных газов нашли широкое применение в экспериментах по поиску темной материи. Для регистрации ионизационных сигналов, вызванных рассеянием частиц в жидкой фазе, обычно используют эффект пропорциональной электролюминесценции в газовой фазе. Помимо стандартного механизма электролюминесценции, основанного на излучении эксимеров благородного газа в вакуумном ультрафиолете, недавно был обнаружен механизм тормозного излучения электронов на нейтральных атомах с непрерывным спектром от ультрафиолета до ближнего инфракрасного диапазона. В данной работе мы продемонстрируем влияние эффекта тормозного излучения на характеристики двухфазного детектора DarkSide-50 на основе аргона. В частности, будет оценен прогиб сетки электролюминесцентного зазора и произведена оценка вклада быстрой компоненты в сигнал пропорциональной электролюминесценции.*

**Ключевые слова:** детекторы на основе жидких благородных газов, детекторы темной материи, пропорциональная электролюминесценция, тормозное излучение, DarkSide-50.

*Введение.* Пропорциональная электролюминесценция (ЭЛ) в благородных газах используется в двухфазных детекторах для регистрации ионизационных сигналов в газовой фазе [1, 2], вызванных рассеянием частиц в жидкой фазе (так называемые S2 сиг-

<sup>1</sup> Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, 630090 Россия, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 11; e-mail: V.P.Oleynikov@inp.nsk.su.

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, 630090 Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1.

налы) [3]. Такие двухфазные детекторы находят широкое применение в экспериментах по поиску темной материи и в экспериментах по регистрации нейтрино низких энергий.

Стандартный механизм пропорциональной электролюминесценции объясняется излучением в вакуумном ультрафиолете (ВУФ) эксимеров благородного газа  $\text{Ar}_2^*(^1,^3\Sigma_u^+)$ , образованных в трехчастичных атомных столкновениях возбужденных атомов  $\text{Ar}^*(3p^5 4s^1)$  с атомами в основном состоянии. Возбужденные атомы, в свою очередь, образуются дрейфующими электронами в электрон-атомных столкновениях (см. обзор [2]). Данный механизм излучения имеет порог по удельному электрическому полю около 4 Тд, обусловленный порогом возбуждения атомов аргона ( $1 \text{ Тд} = 10^{-17} \text{ В}\cdot\text{см}^2$ , что соответствует электрическому полю в газе 0.87 кВ/см при температуре 87 К).

Помимо стандартного механизма пропорциональной электролюминесценции недавно был открыт механизм пропорциональной электролюминесценции тормозного излучения дрейфующих электронов, рассеянных на нейтральных атомах (так называемое Тормозное Излучение на Нейтралах, ТИН) [4]. Как оказалось, эффект ТИН позволяет объяснить два свойства электролюминесценции: наличие излучения ниже порога возбуждения аргона и значительный вклад излучения вне ВУФ, простирающегося от ультрафиолета (УФ) до ближнего инфракрасного диапазона (БИК).

В данной работе будет рассмотрено возможное влияние эффекта ТИН на работу двухфазного детектора темной материи DarkSide-50. Во-первых, будет произведена оценка прогиба сетки ЭЛ зазора за счет действия электрического поля. Во-вторых, будет оценен вклад быстрой компоненты в сигнал S2. Данные расчеты позволят не только более детально описать эффекты, наблюдаемые в детекторе DarkSide-50, но и будут необходимы для выбора оптимальной конструкции и режима работы разрабатываемого в настоящее время детектора темной материи DarkSide-20k [5].

*Описание детектора для изучения эффекта ТИН.* Для изучения эффекта ТИН использовался двухфазный детектор на основе аргона, разработанный в ИЯФ СО РАН. Сигнал S2 регистрировался несколькими способами. Во-первых, электролюминесцентный сигнал регистрировался четырьмя фотоэлектронными умножителями (ФЭУ), расположенными по периметру ЭЛ зазора. В одном случае [4] перед тремя из четырех ФЭУ на акриловый короб был нанесен сместитель спектра для переизлучения ВУФ в видимый диапазон, в то время как перед четвертым ФЭУ сместитель спектра отсутствовал. В другом случае все ФЭУ использовались без сместителя спектра [6]. Во-вторых, электролюминесцентный сигнал регистрировался матрицей кремниевых фотоумножителей (Si-ФЭУ).

ФЭУ, перед которыми был нанесен сместитель спектра, регистрировали пропорциональную электролюминесценцию, вызванную как излучением эксимеров благородного газа  $\text{Ar}_2^*(1,3\Sigma_u^+)$ , так и эффектом ТИН. ФЭУ, перед которыми сместитель спектра отсутствовал, и матрица Si-ФЭУ в основном регистрировали ТИН. Более детальное описание детектора представлено в работах [4, 6].

*Описание детектора DarkSide-50.* Основным элементом детектора DarkSide-50 является времяпроекционная камера на основе аргона, работающая в двухфазном (жидкость–газ) режиме. В верхней и нижней части камеры установлены ФЭУ, перед которыми расположены кварцевые окна с проводящим покрытием и слоем сместителя спектра. Номинальные толщины дрейфового, эмиссионного и ЭЛ зазоров составляли 347, 5 и 10 мм соответственно. Номинальные значения электрических полей в этих зазорах составляли 0,2, 2,8 и 4,2 кВ/см (4,6 Тд) соответственно. Более подробное описание детектора DarkSide-50 можно найти в работе [7].

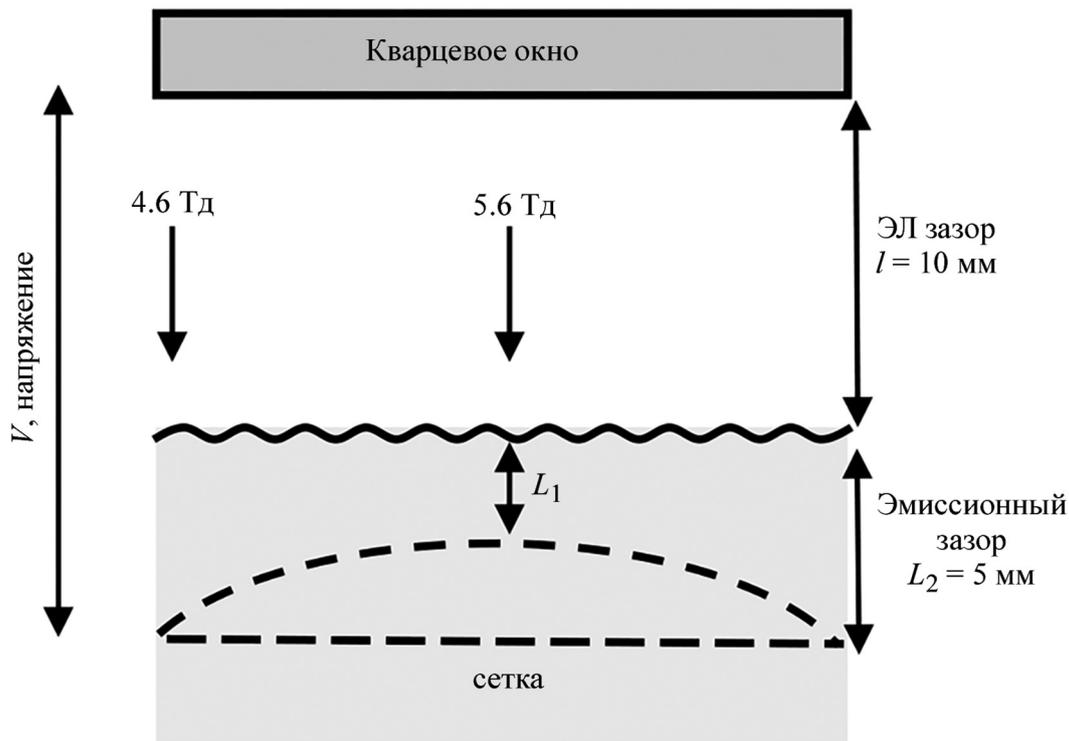


Рис. 1: Схематичное изображение эмиссионного и ЭЛ зазоров детектора DarkSide-50.

*Расчет прогиба сетки в детекторе DarkSide-50.* Одним из негативных эффектов в детекторе DarkSide-50 является зависимость числа регистрируемых фотоэлектронов

для сигнала S2 от координат события в плоскости ЭЛ зазора: сигнал S2 уменьшался более чем в три раза от центра к краям камеры [7]. Возможное объяснение данного эффекта заключается в прогибе сетки, что приводит к изменению толщины эмиссионного и дрейфового зазоров и, следовательно, значений электрического поля в камере относительно номинальных значений (см. рис. 1).

Электрическое поле в ЭЛ зазоре ( $E$ ) выражается следующей формулой:

$$E = \frac{V}{L/\varepsilon + l}, \quad (1)$$

где  $V$  – напряжение между проводящим покрытием кварцевого окна и сеткой,  $L$  – толщина эмиссионного зазора,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость жидкого аргона,  $l$  – толщина ЭЛ зазора.

При помощи выражения (1) величина прогиба сетки находится следующим образом:

$$S = L_2 - L_1 = L_2 - \frac{L_2/\varepsilon + l}{E_1/E_2}, \quad (2)$$

где  $E_1$  и  $E_2$  – значения электрического поля в ЭЛ зазоре в центре и на краях камеры соответственно,  $L_1$  и  $L_2$  – толщина эмиссионного зазора в центре и на краях. Таким образом, для вычисления прогиба сетки необходимо знать отношение электрических полей в ЭЛ зазоре в центре и на краях камеры. Вычислить значение электрического поля можно при помощи зависимости выхода пропорциональной электролюминесценции  $Y_{WLS}$  от величины поля, измеренной в нашей предыдущей работе при использовании сместителя спектра перед ФЭУ [6]. Согласно данной зависимости при изменении электрического поля от 4.6 до 5.6 Тд амплитуда электролюминесцентного сигнала увеличивается в три раза. Подставляя отношение полей  $E_1/E_2 = (5.6 \pm 0.1)/(4.6 \pm 0.1)$  в выражение (2), можно найти прогиб сетки, который оказывается равным  $3.6 \pm 0.6$  мм.

Приведенный расчет указывает на значительный прогиб сетки, поэтому изменение эмиссионного и электролюминесцентного полей должно учитываться при анализе данных DarkSide-50. В разрабатываемом детекторе DarkSide-20k сетка будет иметь большие размеры, чем в детекторе DarkSide-50, поэтому оценка величины прогиба сетки имеет важное значение для оптимизации конструкции детектора.

*Оценка вклада быстрой компоненты в сигнал S2 детектора DarkSide-50.* Рассмотрим два случая регистрации сигнала пропорциональной электролюминесценции. В первом случае, без использования сместителя спектра, выход электролюминесценции

$(Y_{\text{noWLS}})$  определяется только эффектом ТИН ( $Y_{\text{NBrs}}$ ):

$$Y_{\text{noWLS}} = Y_{\text{NBrs}}. \quad (3)$$

Во втором случае, при использовании сместителя спектра, выход электролюминесценции ( $Y_{\text{WLS}}$ ) определяется как эффектом ТИН, так и стандартным механизмом излучения эксимеров. Эксимеры в синглетном состоянии имеют константу времени излучения 4.2 нс [2] и дают вклад в быструю компоненту электролюминесценции ( $Y_{\text{OEL-fast}}$ ). Эксимеры в триплетном состоянии имеют константу времени излучения 3.1 мкс [2] и дают вклад в медленную компоненту электролюминесценции ( $Y_{\text{OEL-slow}}$ ):

$$Y_{\text{WLS}} = Y_{\text{OEL-fast}} + Y_{\text{OEL-slow}} + k \cdot Y_{\text{NBrs}}, \quad (4)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий разную спектральную чувствительность детектора к ТИН для детектора со сместителем спектра и без него. Анализируя спектральные зависимости стандартной электролюминесценции и электролюминесценции за счет ТИН, представленные в работе [4], для детектора DarkSide-50 была получена оценка  $k = 0.6 \pm 0.1$ .

Принимая во внимание, что время высвечивания ТИН менее или порядка времени излучения эксимеров в синглетном состоянии [4], определим вклад быстрой компоненты в сигнал S2 ( $p_{\text{fast}}$ ) при использовании сместителя спектра в детекторе следующим образом:

$$p_{\text{fast}} = \frac{Y_{\text{OEL-fast}} + k \cdot Y_{\text{NBrs}}}{Y_{\text{OEL-fast}} + Y_{\text{OEL-slow}} + k \cdot Y_{\text{NBrs}}}. \quad (5)$$

С учетом выражений (3) и (4) вклад быстрой компоненты в сигнал S2 (5) можно представить в следующем виде:

$$p_{\text{fast}} = 1 - \frac{R}{1 + R} \left( 1 - k \cdot \frac{Y_{\text{noWLS}}}{Y_{\text{WLS}}} \right),$$

где  $R = Y_{\text{OEL-slow}}/Y_{\text{OEL-fast}}$  – соотношение интенсивностей излучения медленной и быстрой компоненты для стандартного механизма электролюминесценции. В качестве оценки величина  $R = 5.5 \pm 0.6$  была взята из работы [8], где изучались первичные сцинтилляции в газообразном аргоне в отсутствие электрического поля при облучении газа  $\alpha$ -частицами.

Воспользовавшись зависимостью  $Y_{\text{noWLS}}/Y_{\text{WLS}}$  от поля в ЭЛ зазоре [4, 6], получим следующие значения вклада быстрой компоненты в сигнал S2:  $p_{\text{fast}}(4.6 \text{ Тд}) = 0.6 \pm 0.1$  и  $p_{\text{fast}}(5.6 \text{ Тд}) = 0.4 \pm 0.1$ . В то же время в эксперименте DarkSide-50 были получены

значения  $p_{\text{fast}}$  (4.6–5.6 Тд) =  $0.07 \pm 0.09$  [9], что существенно ниже наших расчетных значений. Предположительно такое отличие могло возникнуть из-за неоднозначного определения параметров функции фитирования при анализе формы сигнала S2 на детекторе DarkSide-50. Для достоверного анализа формы сигнала S2 необходимы более детальные измерения в широком диапазоне электрических полей как со сместителем спектра, так и без него.

*Заключение.* В данной работе было рассмотрено влияние эффекта ТИН на результаты, полученные с помощью двухфазного детектора на основе аргона DarkSide-50. Используя зависимость выхода пропорциональной электролюминесценции от поля в ЭЛ зазоре, измеренной в работах [4, 6], для детектора DarkSide-50 был оценен прогиб сетки и вклад быстрой компоненты в сигнал S2. Согласно расчетам максимальный прогиб сетки составил  $3.6 \pm 0.6$  мм при номинальном расстоянии между электродами в 5 мм. Вклад быстрой компоненты в сигнал S2 составил  $0.6 \pm 0.1$  и  $0.4 \pm 0.1$  при минимальном и максимальном поле в ЭЛ зазоре соответственно. Данные расчеты позволят не только более детально описать эффекты, наблюдаемые в детекторе DarkSide-50, но и будут необходимы для выбора оптимальной конструкции и режима работы нового разрабатываемого детектора темной материи DarkSide-20k[5].

Работа частично поддержана грантом Российского научного фонда (№ 20-12-00008).

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] C. A. B. Oliveira, H. Schindler, R. J. Veenhof, et al., Phys. Lett. B **703**(3), 217 (2011). DOI: 10.1016/j.physletb.2011.07.081.
- [2] A. Buzulutskov, Europhys. Lett. **117**(3), 39002 (2017). DOI: 10.1209/0295-5075/117/39002.
- [3] V. Chepel and H. Araujo, J. Instrum. **8**, R04001 (2013). DOI: 10.1088/1748-0221/8/04/R04001.
- [4] A. Buzulutskov, E. Shemyakina, A. Bondar, et al., Astropart. Phys. **103**, 29 (2018). DOI: 10.1016/j.astropartphys.2018.06.005.
- [5] C. E. Aalseth et al. (DarkSide Collaboration), Eur. Phys. J. Plus **133**, (2018). DOI: 10.1140/epjp/i2018-11973-4.
- [6] A. Bondar, A. Buzulutskov, A. Dolgov, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **958**, 162432 (2020). DOI: 10.1016/j.nima.2019.162432.
- [7] P. Agnes et al. (DarkSide Collaboration), Phys. Lett. B **743**, 456 (2015). DOI: 10.1016/j.physletb.2015.03.012.

- [8] C. Amsler, V. Boccone, A. Büchler, et al., J. Instrum. **3**, P02001 (2008). DOI: 10.1088/1748-0221/3/02/P02001.
- [9] P. Agnes et al. (DarkSide Collaboration), Nucl. Instr. Meth. A **904**, 23 (2018). DOI: 10.1016/j.nima.2018.06.077.

Поступила в редакцию 13 декабря 2019 г.

После доработки 16 апреля 2020 г.

Принята к публикации 17 апреля 2020 г.

*Публикуется по рекомендации Московской международной школы физики–2019 (ФИАН, Москва).*