

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ИЗМЕРЕНИЙ ИОНИЗАЦИОННЫХ ВЫХОДОВ ЯДЕР ОТДАЧИ В ЖИДКОМ АРГОНЕ МЕТОДОМ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ В ДВУХФАЗНОМ ДЕТЕКТОРЕ

**А. Е. Бондарь^{1,2}, А. Ф. Бузулуцков^{1,2}, Е. С. Гришняев¹, А. Д. Долгов², В. В. Носов^{1,2}, В.
П. Олейников^{1,2,*}, С. В. Полосаткин^{1,3}, 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, 630090, Новосибирск, Россия

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

³ Новосибирский государственный технический университет
пр-т Карла Маркса, 20, Новосибирск, 630073, Россия

Измерение ионизационных выходов ядер отдачи имеет отношение к энергетической калибровке детекторов темной материи и низкоэнергетических нейтрино. В настоящей работе обсуждаются некоторые результаты предыдущих измерений ионизационных выходов ядер отдачи в жидком аргоне методом рассеяния нейтронов в двухфазном детекторе. Предлагаются методы по повышению светосбора сцинтилляционного (S_1) и ионизационного (S_2) сигналов в двухфазном детекторе путем использования SiPM-матриц и электродов THGEM с повышенной оптической прозрачностью. Данные шаги необходимы для реализации метода двойного рассеяния нейтронов, который позволит измерить ионизационный выход ядер отдачи в ранее неизученном диапазоне энергий.

SOME ISSUES OF MEASUREMENT OF THE IONIZATION YIELDS OF NUCLEAR RECOILS IN LIQUID ARGON USING NEUTRON SCATTERING TECHNIQUE IN A TWO- PHASE DETECTOR

**A. E. Bondar, A. F. Buzulutskov, A. D. Dolgov, E. S. Grishnyaev, V. V. Nosov, V. P.
Oleynikov*, S. V. Polosatkin, L.I. Shekhtman, E. O. Shemyakina, A. V. Sokolov**

Measurement of the ionization yields of nuclear recoils is related to the energy calibration of dark matter detectors and low-energy neutrinos. In the present work, some results of the previous measurements of the ionization yields of nuclear recoils in liquid argon using neutron scattering

* E-mail: V.P.Oleynikov@inp.nsk.su (corresponding author)

technique in a two-phase detector are discussed. Methods to increase light collection of scintillation (S_1) and ionization (S_2) signals in a two-phase detector using SiPM matrices and THGEM electrodes with increased optical transparency are proposed. These steps are necessary to realize the neutron double-scattering technique, which will allow us to measure the ionization yields of nuclear recoils in the unexplored energy range.

PACS: 95.35.+d; 72.10.-d; 29.40.-n; 95.55.Vj

Введение

Энергетическая калибровка детекторов ядер отдачи в жидком Ar и Xe имеет важное значение для низкофоновых экспериментов по прямому поиску темной материи и регистрации когерентного рассеяния нейтрино на ядрах [1]. Такая калибровка обычно осуществляется путем измерения ионизационных выходов и сцинтилляционных эффективностей ядер отдачи при упругом рассеянии нейтронов на ядрах. В то время как для жидкого Xe существует множество экспериментальных данных по ионизационным выходам [2-4], мало что известно об ионизационных выходах в жидком Ar.

Ионизационный выход, измеряемый в эксперименте, определяется следующим образом:

$$Q_y = n_e / E_0. \quad (1)$$

Здесь n_e – заряд первичной ионизации, т.е. число электронов ионизации, избежавших рекомбинации с положительными ионами; этот заряд зависит от энергии, выделенной ядром отдачи в жидкости (E_0), и от электрического поля в жидкости (\mathcal{E}). n_e всегда меньше, чем начальное число электрон-ионных пар, образованных в жидкости ядром отдачи (N_i). В двухфазном детекторе можно выделить две части сигнала: S_1 , вызванный сцинтилляциями в жидкости, и S_2 , вызванный ионизацией в жидкой фазе и последующей электролюминесценцией (ЭЛ) в газовой фазе.

Выражение (1) справедливо для как электронов отдачи, вызванных облучением вещества электронами или гамма-квантами, так и ядер отдачи. Принято обозначать соответствующую энергию отдачи в единицах keVee (electron-equivalent recoil) и keVnr (nuclear recoil).

Первые результаты по ионизационным выходам ядер отдачи в жидком Ar были получены буквально за последние 3 года: при более низких энергиях, 6,7 кэВ [5] и 17-57 кэВ [6], и при более высоких энергиях, 80 и 233 кэВ [7], 233 кэВ [8]. В работе [8] сравниваются результаты этих экспериментов, приведенные к определенному значению электрического поля: см. Рис. 1 (взяты из [8]).

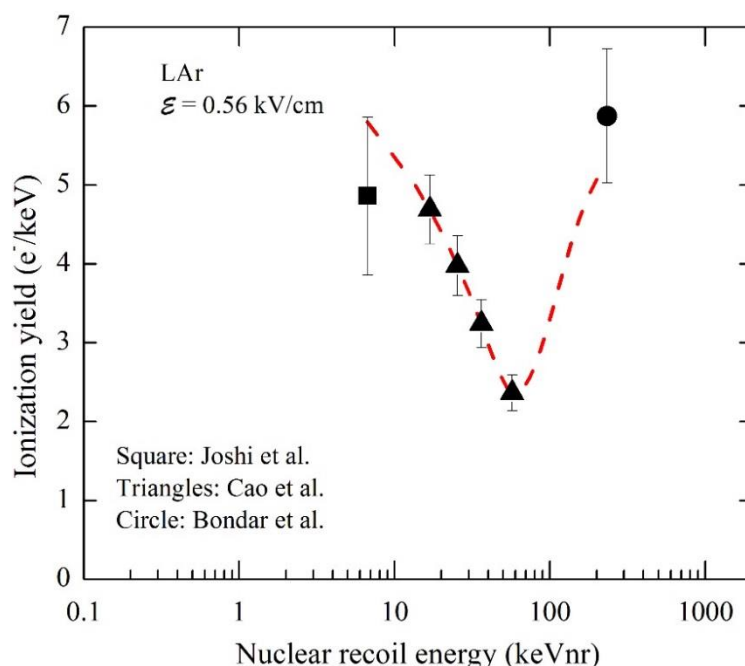


Рис. 1. Ионизационные выходы ядер отдачи в жидком Ar как функция энергии, измеренные в Joshi et al. [5], Cao et al. [6] и в Bondar et al. [8] и экстраполированные к значению электрического поля 0,56 кВ/см. Кривая отображает предполагаемую энергетическую зависимость.

Видно, что ионизационный выход может зависеть от энергии нетривиальным образом: ионизационный выход сначала уменьшается, а затем растет с энергией, проходя через минимум. Стоит отметить, что подобная энергетическая зависимость ранее наблюдалась для электронов отдачи в жидком Ar [9]. С другой стороны, энергетическая зависимость для ядер отдачи в жидком Xe является монотонной в диапазоне от 1 до 300 keVnr [10].

Чтобы решить вопрос о характере зависимости ионизационных выходов ядер отдачи от энергии в настоящей работе предлагаются способы повышения светосбора сигналов S_1 и S_2 для реализации метода двойного рассеяния нейтронов [11], который мог бы позволить измерить ионизационные выходы для ядер отдачи с энергией ниже 233 кэВ.

Изучение сигнала S_1

Для измерения ионизационного выхода в жидком аргоне ранее [7, 8] использовался метод вычитания спектров, чтобы отделить события с упругим рассеянием нейтрона от радиационного захвата нейтрона (с испусканием гамма-кванта). Другая возможность заключается в использовании соотношения между сигналами S_1 и S_2 или соотношения между быстрой и медленной компонентой сигнала S_1 . Наличие такого критерия позволит производить

идентификацию типа события, что является необходимым условием для реализации измерения ионизационных выходов ядер отдачи методом двойного рассеяния нейтронов.

Для изучения сигнала S_1 использовалась установка с двухфазным детектором, описанная в [8]. На Рис. 2 представлена осциллограмма сигнала от суммы четырех ФЭУ при облучении детектора нейтронами. Напряжение на ФЭУ 800 В, напряжение на делителе ЭЛ зазора $V_0 = 14$ кВ. На первом канале осциллографа сигнал проходил через усилитель с временем формирования 1 мкс, на третьем - с 200 нс. В качестве триггера использовался сигнал S_2 на первом канале. На третьем канале в центре осциллограммы виден короткий сигнал, который, очевидно, соответствует сигналу S_1 . Через время 15 мкс, соответствующее времени дрейфа ионизации через жидкость, расположен сигнал S_2 .

Чтобы корректно выделить сигналы S_1 был проведен другой эксперимент с источником ^{22}Na . Данный источник излучает позитрон, который при аннигиляции порождает два коллинеарных гамма-кванта с энергией 511 кэВ. Один из них попадает в счетчик со сцинтиллятором BGO, который дает триггерный сигнал, а другой попадает в детектор: см. Рис 3.

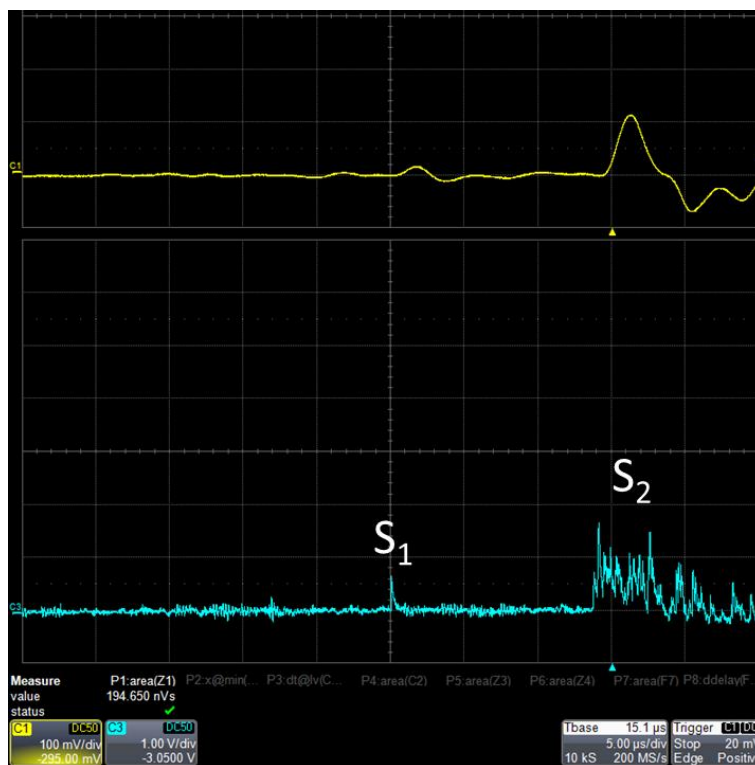


Рис. 2. Осциллограмма сигнала от суммы четырех ФЭУ при облучении детектора нейтронами. Показанные первый (C1) и третий (C3) каналы осциллографа отличаются временем формирования усилителя

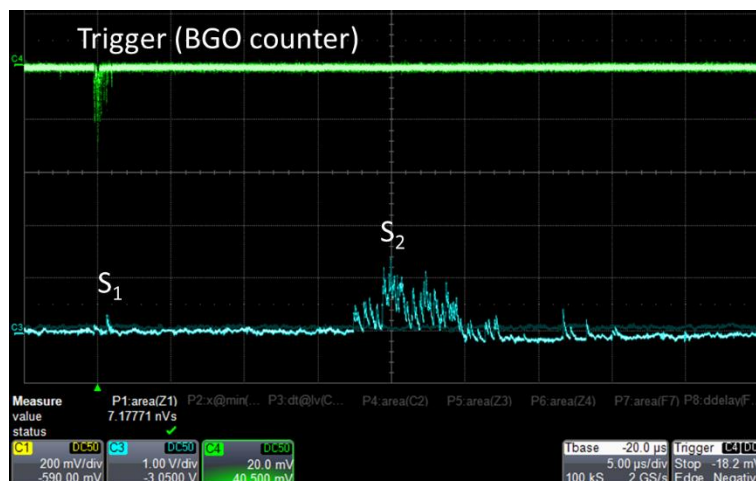


Рис. 3. Осциллограммы сигналов при облучении детектора источником ^{22}Na . Четвертый канал (C4) – сигнал с BGO счетчика. Третий канал (C3) – сигнал от суммы четырех ФЭУ

На Рис. 4 представлена гистограмма положения сигналов S_1 относительно времени триггера. Как можно заметить, в районе нуля есть пик. Значит, это действительно сигналы S_1 .

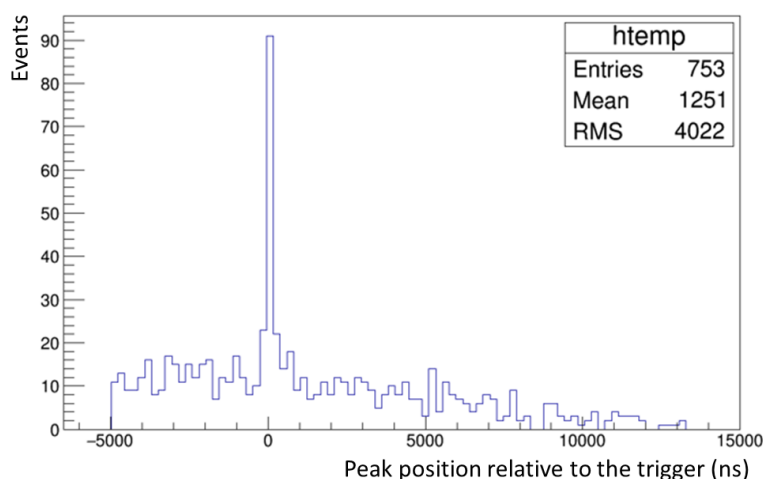


Рис. 4. Положение вероятных сигналов S_1 относительно триггера

Анализ амплитудного спектра событий, находящихся в районе пика, показал, что амплитуда сигнала S_1 составляет от 1 до 3 фотоэлектронов. Такой амплитуды будет недостаточно для корректного использования критериев разделения нейтронов и гамма-квантов. Единственный выход заключается в модернизации установки и увеличении светосбора сигнала S_1 .

Повышение светосбора сигнала S_1

Наиболее эффективный метод увеличения светосбора сигнала S_1 заключается в расположении матрицы фотоприемников, в частности SiPM-матрицы, как сверху ЭЛ зазора, так и на дне детектора. Для покрытия активной области $10 \times 10 \text{ см}^2$ можно использовать матрицу размером 12×12 элементов, составленную из кремниевых фотоумножителей SiPM S13360-6050PE. Одна из проблем заключается в большом количестве используемых каналов SiPM. Для

решения проблемы каждые 9 элементов матрицы будут объединяться в один канал при помощи параллельно-последовательного подключения: см. Рис 5 и Рис. 6.

Была проведена серия тестов с последовательным и параллельным подключением двух SiPM S13360-6050PE, погруженных в жидкий азот. Наблюдалась стабильная работа в обоих случаях. Подробное описание изменения характеристик сигнала в зависимости от типа подключения будет приведено в следующих статьях.

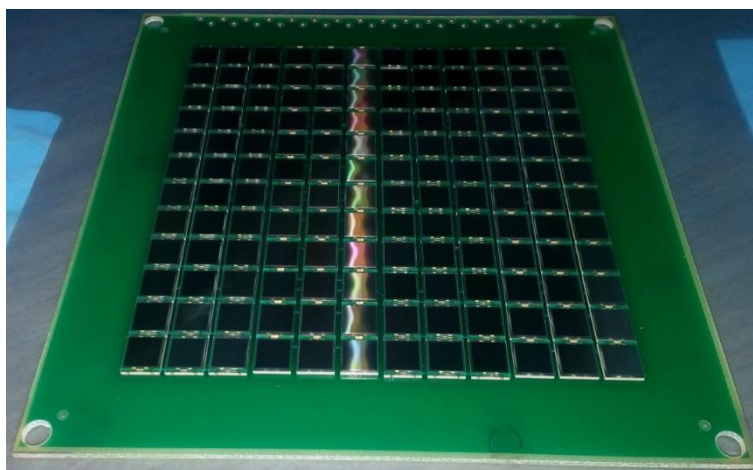


Рис. 5. Матрица размером 12 на 12 элементов, составленная из SiPM S13360-6050PE

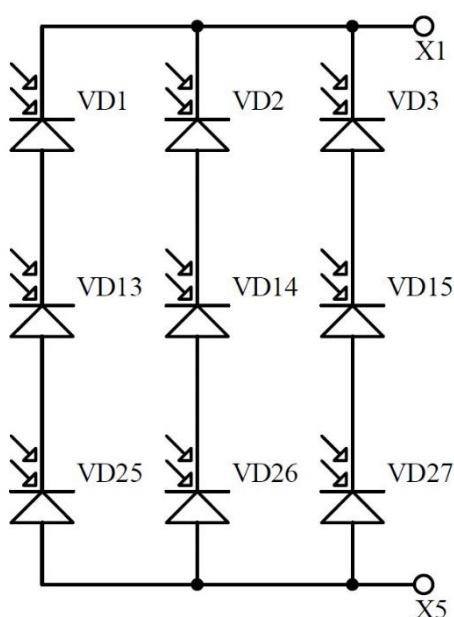


Рис. 6. Электрическая схема соединения элементов матрицы

THGEM повышенной прозрачности

На данный момент в установке расположены два толстых газовых электронных умножителя, THGEM0 и THGEM1, которые используются в качестве электродов ЭЛ зазора. Геометрическая прозрачность обоих THGEM составляет 27%. Для увеличения светосбора S2 сигнала, регистрируемого из ЭЛ зазора с помощью верхней SiPM-матрицы, планируется

заменить THGEM1 на аналогичный, но с большим диаметром отверстий. Кроме того, замена THGEM0 и THGEM1 на более прозрачные позволит повысить светосбор и для сигнала S_1 на верхнюю матрицу.

Для этих целей были изготовлены THGEM четырех разных типов: с толщиной 0.5 мм или 1 мм; с прозрачностью 48% или 75% (см. Рис. 7, 8, 9). В дальнейшем будут проведены испытания и выбран THGEM, обладающий оптимальным соотношением между прозрачностью и механической прочностью.

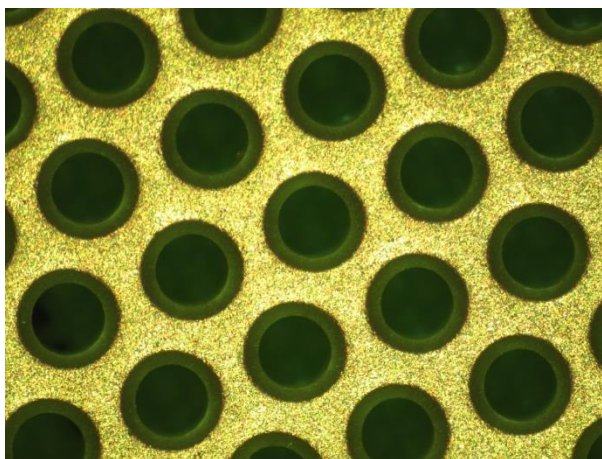


Рис. 7. THGEM с прозрачностью 27%

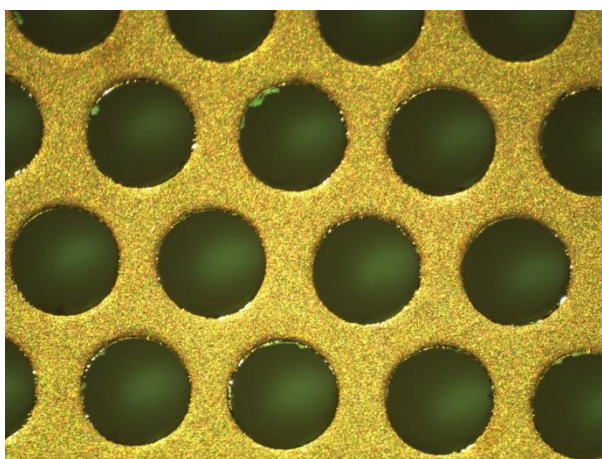


Рис. 8. THGEM с прозрачностью 48%

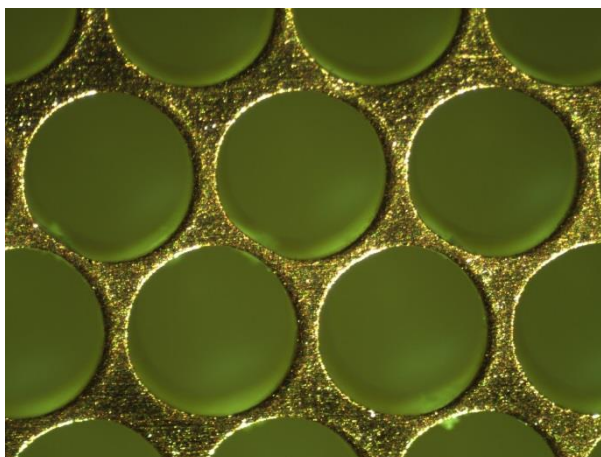


Рис. 9. THGEM с прозрачностью 75%

Заключение

В данной работе рассмотрены некоторые результаты предыдущих измерений ионизационных выходов ядер отдачи в жидком аргоне методом рассеяния нейтронов в двухфазном детекторе. Продемонстрировано, что в двухфазном детекторе, использованном нами ранее для измерения ионизационных выходов в жидком аргоне [8] путем регистрации электролюминесцентного сигнала (S2), можно регистрировать и сигнал первичной сцинтилляции (S1). Его амплитуда, однако, оказалась недостаточной для эффективного отделения событий с ядрами отдачи от гамма-фона. Были предложены методы по повышению светосбора сигналов S_1 и S_2 с использованием SiPM-матриц и THGEM-электродов с повышенной оптической прозрачностью. Данные шаги необходимы для реализации метода двойного рассеяния нейтронов, который позволит измерить ионизационные выходы ядер отдачи при энергиях ниже 233 кэВ. Измерение ионизационных выходов в широком диапазоне энергий имеет важное значение для энергетической калибровки детекторов на основе жидких благородных газов, используемых для поиска темной материи, и для понимания механизмов регистрации ионизации в жидком Ar.

Благодарности

Работа поддержана Российским Научным Фондом (проект 14-50-00080); она выполнена в рамках исследовательской программы для эксперимента DarkSide-20k.

Список литературы

1. *Chepel V., Araujo H.* Liquid noble gas detectors for low energy particle physics // J. of Instrumentation. 2013. Vol. 8. R04001.
2. *Manzur A., Curioni A., Kastens L., McKinsey D.N., Ni K., Wongjirad T.* Scintillation efficiency and ionization yield of liquid xenon for monoenergetic nuclear recoils down to 4 keV // Phys. Rev. C. 2010. Vol. 81. 025808.

3. *Horn M., Belov V.A., Akimov D.Yu., Araújo H.M., Barnes E.J., Burenkov A.A., Chepel V., Currie A., Edwards B., Ghag C., Hollingsworth A., Kalmus G.E., Kobayakin A.S., Kovalenko A.G., Lebedenko V.N.* Nuclear recoil scintillation and ionisation yields in liquid xenon from ZEPLIN-III data // *Phys. Lett. B.* 2011. Vol. 705. P. 471.
4. *Plante G., Aprile E., Budnik R., Choi B., Giboni K.-L., Goetzke L. W., Lang R. F., Lim K. E., Melgarejo Fernandez A. J.* New measurement of the scintillation efficiency of low-energy nuclear recoils in liquid xenon // *Phys. Rev. C.* 2011. Vol. 84. 045805.
5. *Joshi T. H., Sangiorgio S., Bernstein A., Foxe M., Hagmann C., Jovanovic I., Kazkaz K., Mozin V., Norman E. B., Pereverzev S. V., Rebassoo F., Sorensen P.* First Measurement of the Ionization Yield of Nuclear Recoils in Liquid Argon // *Phys. Rev. Lett.* 2014. Vol. 112. 171303.
6. *Cao H. et al. (The SCENE Collaboration)* Measurement of scintillation and ionization yield and scintillation pulse shape from nuclear recoils in liquid argon // *Phys. Rev. D.* 2015. Vol. 91. 092007.
7. *Bondar A., Buzulutskov A., Dolgov A., Grishnyaev E., Polosatkin S., Shekhtman L., Shemyakina E., Sokolov A.* Measurement of the ionization yield of nuclear recoils in liquid argon at 80 and 233keV // *Europhys. Lett.* 2014. Vol. 108. 12001.
8. *Bondar A., Buzulutskov A., Dolgov A., Grishnyaev E., Nosov V., Oleynikov V., Polosatkin S., Shekhtman L., Shemyakina E., Sokolov A.* Measurement of the ionization yield of nuclear recoils in liquid argon using a two-phase detector with electroluminescence gap // *J. of Instrumentation.* 2017. Vol. 12. C05010.
9. *Bondar A., Buzulutskov A., Dolgov A., Shekhtman L., Sokolov A.* X-ray ionization yields and energy spectra in liquid argon // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2016. Vol. 816. P. 119.
10. *Lenardo B., Kazkaz K., Manalaysay A., Szydagis M., Tripathi M.* A Global Analysis of Light and Charge Yields in Liquid Xenon // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2015. Vol. 62 No. 6. P. 3387.
11. *Akerib D. S. et al. (LUX Collaboration)* Low-energy (0.7–74 keV) nuclear recoil calibration of the LUX dark matter experiment using D-D neutron scattering kinematics // *arXiv:1608.05381v2*