

## Позиционно-чувствительные детекторы тепловых и холодных нейтронов с тонкопленочным конвертором $^{10}\text{B}$ (обзор)

© А.П. Кашук, О.В. Левицкая

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова НИЦ КИ,  
188300 Гатчина, Ленинградская обл., Россия  
e-mail: anatoli.kachtchouk@cern.ch

Поступило в Редакцию 6 марта 2019 г.  
В окончательной редакции 12 октября 2019 г.  
Принято к публикации 24 октября 2019 г.

Представлен краткий аналитический обзор позиционно-чувствительных детекторов тепловых и холодных нейтронов, выполненных на тонкопленочном конверторе  $^{10}\text{B}$ . Основное внимание уделено новым подходам и техническим решениям, определяющим тенденции развития методики.

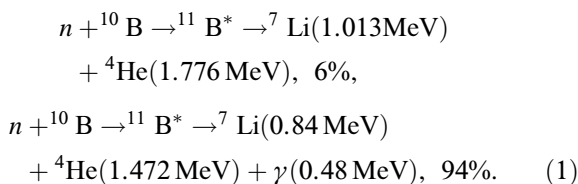
**Ключевые слова:** PSD, LPSD, MWPC, MSGC, MPGD, GEM, MM, Multi-Grid, Multi-Blade, CASCADE,  $\mu$ -TPC.

DOI: 10.21883/JTF.2020.05.49168.85-19

### Введение

Существует сравнительно небольшое количество конверторов нейтронов в заряженные частицы, которые можно регистрировать. Наилучшим конвертором является изотоп гелия  $^3\text{He}$  [1]. В связи с кризисом, обусловленным резким снижением в 2000-е годы производства  $^3\text{He}$  в США, в мире ведется активный поиск альтернативного ему конвертора. Одним из таких конверторов стал изотоп  $^1\text{B}$  бора  $^{10}\text{B}$  в тонкопленочном варианте. Бор широко распространен в природе, и существует высокопроизводительная технология обогащения его изотопом  $^{10}\text{B}$  до концентрации 99%. В работе [2] показано, что пленка карбида бора  $^{10}\text{B}_4\text{C}$  (здесь в молекуле бора четыре атома  $^{10}\text{B}$ ) выдерживает без заметных изменений микроструктуры поток медленных нейтронов до  $1.1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ .

В основе конверсии лежит реакция нейтронного захвата, идущая с относительно большим сечением:  $n + (A, z) \rightarrow (A + 1, z)^*$ , когда ядро атома-конвертора с атомной массой  $A$  и зарядом  $z$  соединяется с нейтроном  $n$  и образует более тяжелое возбужденное ядро, распадающееся на заряженные фрагменты с выделением значительной энергии. Захват нейтрона ядром  $^{10}\text{B}$  и образование заряженных фрагментов идет в соответствии с реакцией:



Как видно из (1), в 6% случаев рождается два энергичных ядра  $^7\text{Li}$  (ядро изотопа лития) и  $^4\text{He}$  (альфа-частица)

с суммарным энерговыделением 2.79 MeV, а в 94% — 0.48 MeV уносится гамма-квантом. Заряженные частицы реакции (1) вылетают из точки захвата нейтрона под углом  $180^\circ$  друг к другу изотропно во всех направлениях, как показано на рис. 1 [3]. Такая кинематика обусловлена маленькой энергией захвата нейтрона и значительной энергией развала возбужденного ядра.

Для теплового нейтрона с энергией  $E_T = kT = 25.3 \text{ meV}$  и длиной волны  $\lambda_0 = 9.04/\sqrt{E_T} = 1.8 \text{ \AA}$  ( $k$  — постоянная Больцмана,  $T = 293 \text{ K}$  — комнатная температура по Кельвину) сечение реакции (1)  $\sigma_0 = 3844 \pm 3 \text{ barn}$ . Для медленных нейтронов другой энергии сечение  $\sigma(\lambda)$  пропорционально  $\lambda/\lambda_0$ . Отметим, что сечение на 28% меньше сечения захвата теплового нейтрона ядром гелия  $^3\text{He}$ , но энергия у каждого фрагмента — намного выше.

Можно встретить PSD<sup>2</sup> (Position Sensitive Detector) на проволочных трубках и проволочных камерах, наполненных под давлением газом  $^{10}\text{BF}_3$  [4]. В настоящем обзоре работы на эту тему опущены. Этот газ, с одной стороны, является ядовитым и по этой причине опасным, а с другой — трудно локализовать точку захвата нейтрона повышением давления газа, так как длина пробега энергичных фрагментов существенно больше, чем с конвертором  $^3\text{He}$ , вследствие чего ухудшается пространственное разрешение.

С тонкопленочным конвертором  $^{10}\text{B}$  значительная часть энергии фрагментов теряется в пленке конвертора, и лишь оставшаяся энергия идет на ионизацию газа. Газовая смесь в таком детекторе может находиться при атмосферном давлении, что существенно упрощает конструкцию корпуса. Обычно используется смесь аргона с гасящей добавкой, например  $\text{CO}_2$ .

<sup>2</sup> Здесь и далее будут использоваться аббревиатуры, принятые в иностранной литературе, так как в отечественной литературе сокращения не устоялись.

<sup>1</sup> Далее заряд ядра опускается.

В университете в Lund (Швеция) совместно с ESS (European Spallation Source) разработана технология напыления тонких пленок карбида бора  $^{10}\text{B}_4\text{C}$ , обогащенного изотопом  $^{10}\text{B}$  [2,5]. Основная задача созданного подразделения — напыление  $6000\text{ m}^2$  пленок для дифрактометров ESS. В качестве подложки для пленочного конвертора используется листовая алюминий (или титан) толщиной, например  $0.5\text{ mm}$ .

Продукты реакции (1) при полной остановке в аргоне могут образовать 50 тысяч электрон-ионных пар (заряд  $\sim 8\text{ fC}$ ). Такой сигнал можно зарегистрировать электроникой без дополнительного усиления в детекторе. Однако поглощение энергии в веществе пленки уменьшает количество первичных электронов в газе. Кроме того, различная ориентация треков энергичных фрагментов вызывает дополнительные флуктуации амплитуды им-

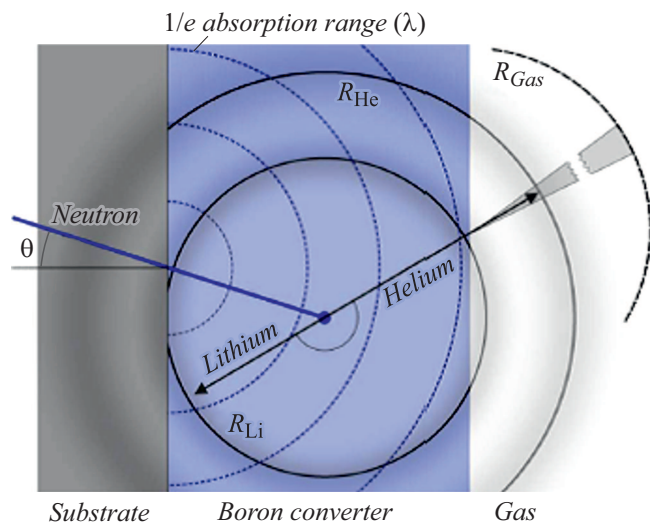


Рис. 1. Продукты реакции захвата нейтрона ядром бора —  $^7_3\text{Li}$ ,  $^4_2\text{He}$  и их пробеги в пленке конвертора [3].

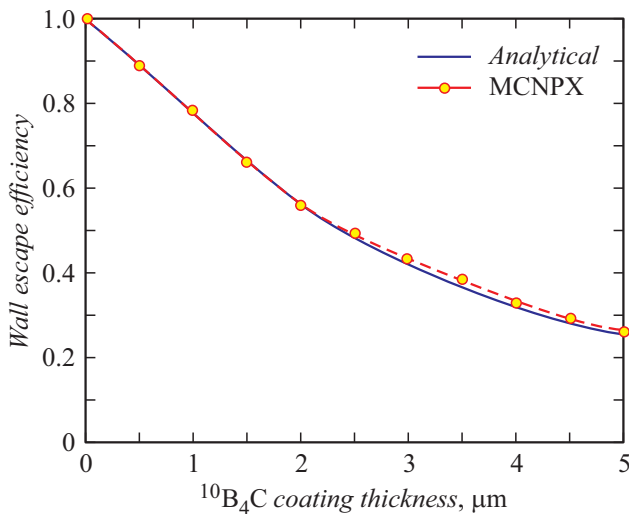


Рис. 2. Зависимость вероятности выхода фрагментов реакции (1) из пленки  $^{10}\text{B}_4\text{C}$  как функция толщины пленки, полученная численным моделированием Монте-Карло [6].

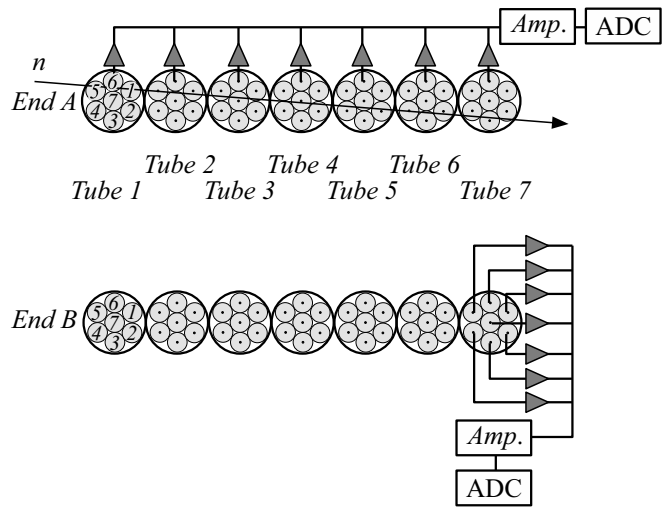


Рис. 3. Схема подключения трубок к электронике [9].

пульсов на считывающих электродах, поэтому необходимо умножение первичного заряда в  $10-100$  раз.

Для эффективной регистрации тепловых и холодных нейтронов (ТХН) необходимо создать определенную концентрацию ядер  $^{10}\text{B}$  на пути нейтрона, для чего слой конвертора должен быть достаточно толстым. Длина пробега зависит от ядра и его энергии, а также от плотности вещества и хорошо считается:  $^3\text{He}$   $3.27\text{ (}4.05\text{)}\mu\text{m}$  для ядер гелия  $^4\text{He}$  с соответствующей энергией  $1.47\text{ (}1.78\text{)}\text{ MeV}$  и  $1.69\text{ (}1.90\text{)}\mu\text{m}$  для ядер лития  $^7\text{Li}$  с энергией  $0.84\text{ (}1.01\text{)}\text{ MeV}$ . Видно, что толщина конверторного слоя должна быть порядка  $1-3\mu\text{m}$ , иначе будет мала вероятность выхода из пленки (рис. 2). При такой толщине конвертора эффективность регистрации нейтрона с  $\lambda_0 = 1.8\text{ \AA}$  не больше 5%, что является недостатком тонкопленочного конвертора. Для увеличения эффективности детектора необходимо набирать определенное количество тонких слоев.

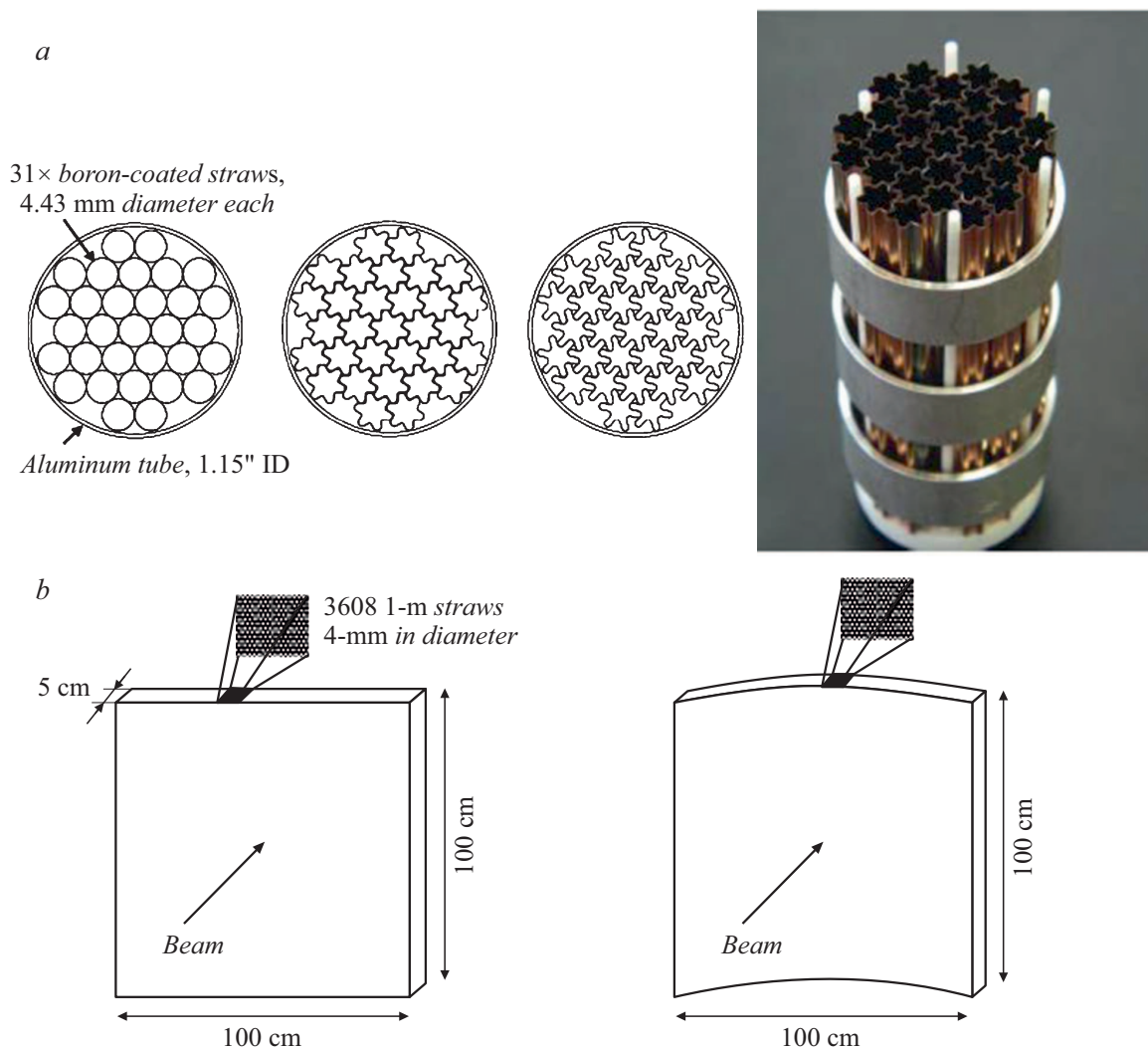
Эффективность многослойного тонкопленочного детектора нельзя выразить простой формулой, как в случае газового конвертора  $^3\text{He}$ . В работах [6,7] можно найти полезные формулы для определения эффективности регистрации нейтрона многослойным детектором.

### Однокоординатные и двухкоординатные детекторы на газоразрядных пропорциональных счетчиках — трубках и строу-трубках

Для регистрации ТХН широкое распространение получили тонкостенные трубки и строу-трубки  $^4$  с покры-

<sup>3</sup> SRIM — The Stopping and Range of Ions in Matter, <http://www.srim.org/>

<sup>4</sup> [https://www.researchgate.net/profile/Jeffrey\\_Lacy2/publication/241636429\\_Performance\\_of\\_a\\_straw\\_based\\_portable\\_neutron\\_coincidence-multiplicity\\_counter/links/590ab4a2a6fdcc4961777840/Performance-of-a-straw-based-portable-neutron-coincidence-multiplicity-counter.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Jeffrey_Lacy2/publication/241636429_Performance_of_a_straw_based_portable_neutron_coincidence-multiplicity_counter/links/590ab4a2a6fdcc4961777840/Performance-of-a-straw-based-portable-neutron-coincidence-multiplicity-counter.pdf)



**Рис. 4.** *a* — блоки из тонкостенных строу-трубок различных профилей, в том числе в форме звездочек, исключающей мертвые зоны между трубками, присущие круглым трубкам; *b* — детекторы ТХН, собранные из блоков трубок с нанесенным на их внутренние поверхности тонкопленочным конвертором  $^{10}\text{B}_4\text{C}$  [6].

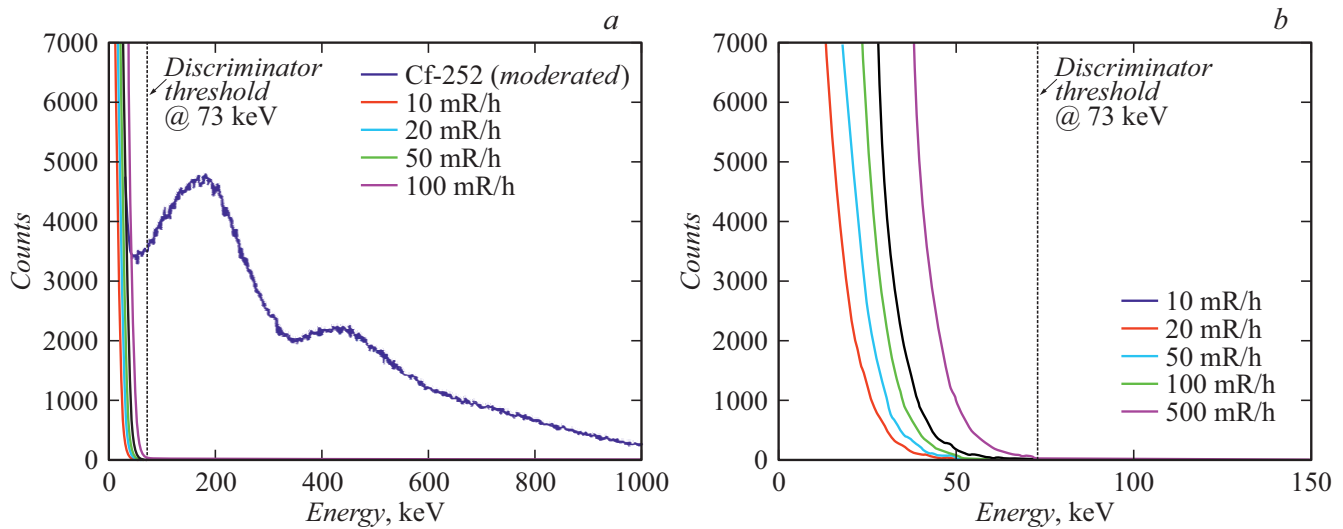
тием катодов карбидом бора  $^{10}\text{B}_4\text{C}$ , наполненные газовой смесью на базе аргона при атмосферном давлении.

Карбид бора — хороший проводник с удельным электрическим сопротивлением  $\sim 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$ , поэтому одновременно он выполняет функцию конвертора и катода. Толщина стенок строу-трубок составляет доли миллиметра, диаметр 4–5 мм, длина 1 м и более.

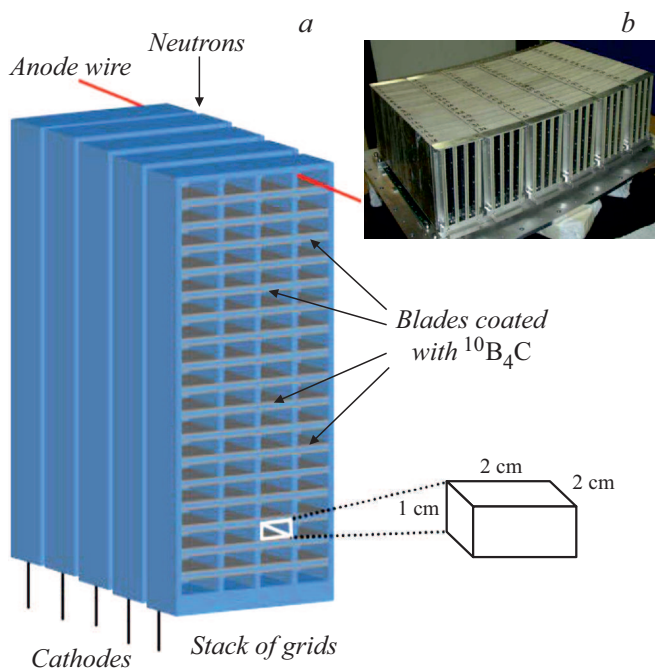
Поскольку при регистрации нейтрона срабатывает одна и только одна трубка в блоке, концы трубок объединяют, как показано на рис. 3 [9], при этом определяется как номер сработавшей трубки (одна координата), так и отношение зарядов (вторая координата). В строу-трубках пространственное разрешение<sup>5</sup> поперек и вдоль трубок составляет 4–5 мм, как в LPSD (Linear Position-Sensitive Detector).

<sup>5</sup> Пространственное разрешение здесь и далее приводится как Full Width Half Maximum (FWHM) — полная ширина на полувысоте.

В работе [6] предложены интересные решения с профилями строу-трубок диаметром 4.5 мм в форме звездочек, чем исключаются мертвые зоны между трубками (рис. 4). Если  $t_{\text{eff}}$  — эффективная толщина конвертора в круглой строу-трубке, то в трубках с формой звездочек толщина увеличивается до  $1.3 \cdot t_{\text{eff}}$  или до  $1.98 \cdot t_{\text{eff}}$ . На фотографии справа показан блок-модуль. Чем больше трубок в блоке на пути нейтрона, тем выше и однороднее по площади эффективность PSD, выполненных таким способом. Из блоков-модулей можно собрать детектор ТХН с чувствительной апертурой  $1 \text{ m}^2$  или детектор для кольцевого дифрактометра с цилиндрическим изгибом детектирующей поверхности для уменьшения параллакса в горизонтальной плоскости. В работе отмечается исключительно высокая надежность трубок. Ускоренные тесты герметично заклеенных трубок с тонкопленочным покрытием катодов карбидом бора  $^{10}\text{B}_4\text{C}$ ,



**Рис. 5.** *a* — амплитудные спектры для ТХН и *b* — для гамма-излучения, откуда получена чувствительность детектора к гамма-фону  $\sim 10^{-8}$  [6]. Слева направо увеличивается интенсивность гамма-фона.



**Рис. 6.** *a* — модуль; *b* — секция детектора Multi-Grid [10].

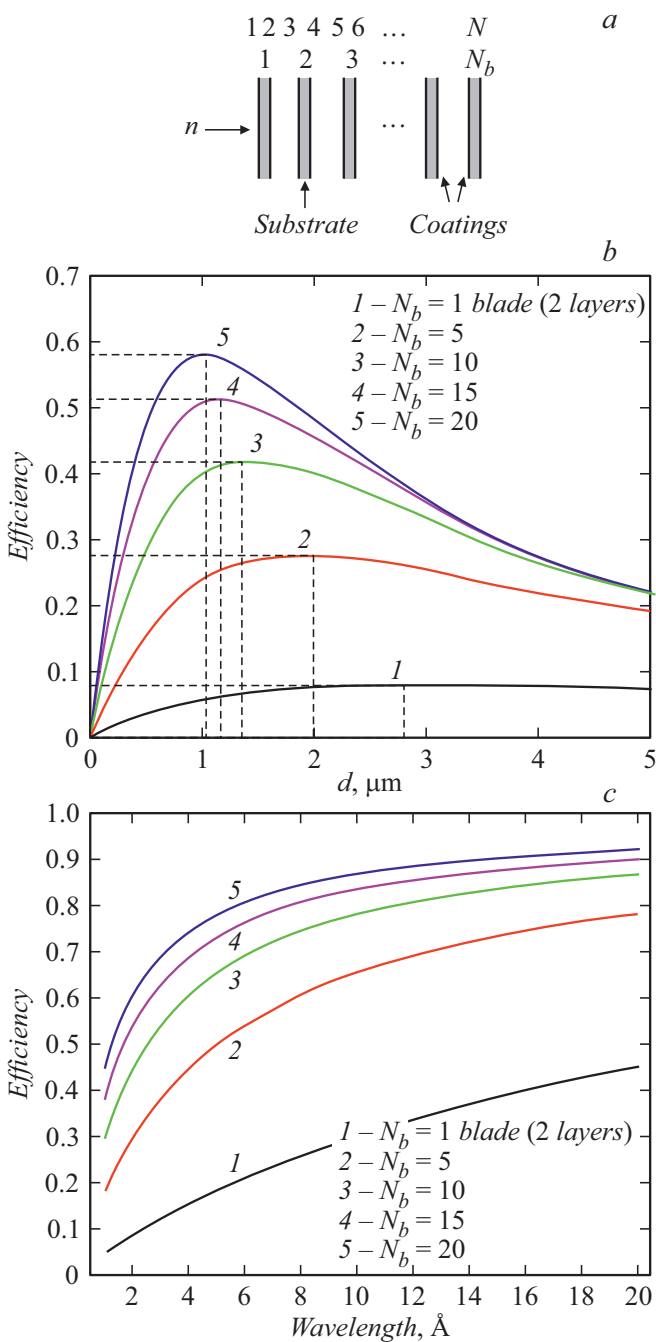
выполненные при экстремальных температурах  $-70$  и  $+125^\circ\text{C}$ , показали время жизни детектора 30 лет. Из амплитудных спектров, приведенных на рис. 5 для ТХН и гамма-фона, получена чувствительность к гамма-фону  $10^{-8}$  при пороге 73 keV.

На рис. 6 представлен детектор Multi-Grid, созданный совместно ИЛЛ и ЕСС для время-пролетного дифрактометра [10–12] с большим расстоянием до исследуемого образца. Нейтрон пересекает 28 конверторных слоев из карбида бора  $^{10}\text{B}_4\text{C}$  с толщиной слоя  $1.2\ \mu\text{m}$ ,

нанесенных на 14 алюминиевых пластинок-подложек толщиной 0.5 mm. В центре каждой ячейки размещена проволочка-анод для умножения первичного заряда. Свойства такого детектора подобны LPSD с диаметром трубки  $\sim 2$  см. Катодом такой трубки являются две стенки ячеек, покрытые карбидом бора. Одна координата нейтрона определяется по номеру сработавшей ячейки, а вторая — делением заряда вдоль анодной проволочки, общей для всех ячеек. При указанном числе слоев обеспечивается достаточно высокая эффективность регистрации нейтронов с  $\lambda = 4\text{--}6\ \text{\AA}$  (рис. 7) при чувствительности к гамма-фону не хуже  $10^{-6}$ .

### Позиционно-чувствительные детекторы на проволочных пропорциональных камерах MWPC

Для повышения эффективности детектора ТХН с тонкопленочным конвертором  $^{10}\text{B}$  широко используется метод, основанный на малом угле  $\alpha$  входа нейтрона в пленку конвертора, как показано на рис. 8 [13]. Метод позволяет на порядок увеличить эффективную толщину одной пленки с  $t_1$  до  $t_{\text{eff}}$  благодаря соотношению:  $t_{\text{eff}} = t_1 / \sin \alpha \approx t_1 / \alpha = 11.5\ \mu\text{m}$  при физической толщине пленки  $t_1 = 1\ \mu\text{m}$  и угле  $\alpha = 5^\circ$ . Рассмотрим реализацию метода на проволочной камере MWPC (Multi-Wire Proportional Chamber), на один из катодов которой нанесен карбид бора  $^{10}\text{B}_4\text{C}$ . Одна координата нейтрона определяется по номеру сработавшей анодной проволочки, вторая — по номеру катодного стрипа, ортогонального анодным проволочкам [13–16]. Методика претерпевала множество изменений. Так, в работе [13] приведены результаты испытаний на нейтронном пучке детектора, выполненного по новой схеме для рефлектометра (ЕСС) с расстоянием до ис-

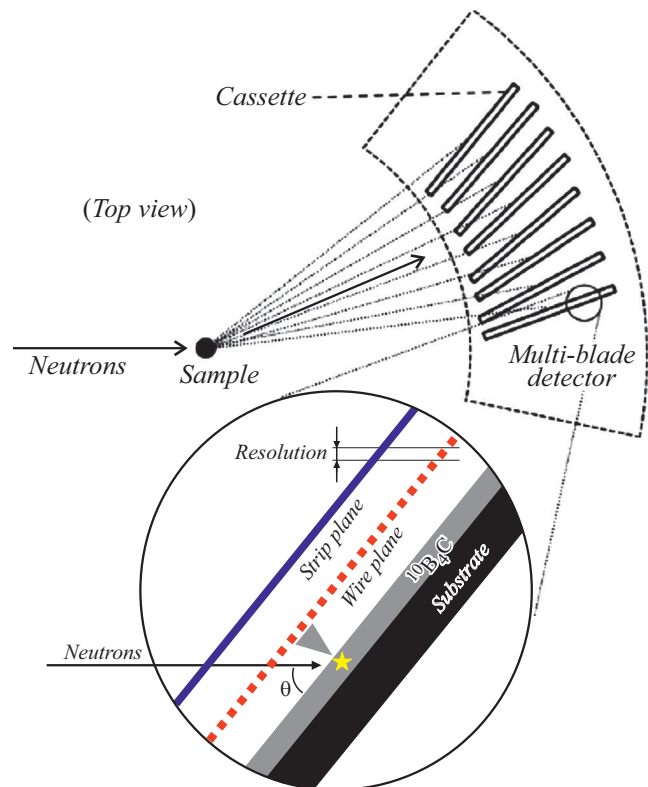


**Рис. 7.** *a* — принцип Multi-Grid; *b* — зависимости эффективности регистрации нейтрона от толщины слоя и числа слоев тонкопленочного конвертора для длины волны  $\lambda = 1.8 \text{ \AA}$ ; *c* — зависимости эффективности от длины волны  $\lambda$  для разных толщин [10]. Снизу вверх нарастает число слоев конвертора.

следуемого образца 3 м. Детектор состоял из 9 касет, размещенных по принципу жалюзи. Новая схема показана на рис. 9, *a* справа. Здесь катодные стрипы размещены на противоположной стороне подложки с конвертором. В одной касете 32 канала электроники для считывания сигналов с анодных проволочек и 32 канала — для считывания сигналов с катодных

стрипов (рис. 9, *b*). Шаг анодных проволочек 4 мм, диаметр 15  $\mu\text{m}$ , шаг катодных стрипов 4 мм, расстояние от проволочек до катода с конвертором 4.6 мм. Расстояние от проволочек до катода со стрипами в геометрии жалюзи не одинаковое. Высота касет 250 мм, ширина (по пучку) — 130 мм. Толщина конверторного слоя  $t_1 = 7.5 \mu\text{m}$ , при которой вероятность захвата нейтрона с  $\lambda = 2.5 \text{ \AA}$  составляет 99% при  $\alpha = 5^\circ$ .

На пучке с размерами  $0.2 \times 10 \text{ mm}$  исследовался стык между смежными касетами. Ширина провалов эффективности, достигающая в старой схеме 50%, в новой уменьшена с 2 до 0.5 мм. Детектор эффективно работает при газовом усилении  $\sim 20$ . Отмеченное падение усиления на первых 7 проволочках происходит из-за несимметричности зазоров анод–катод на участке скошенной пластины-подложки. Для компенсации этого эффекта уменьшен диаметр нескольких проволочек. Поперек проволочек получено субмиллиметровое пространственное разрешение  $\text{FWHM} \sim 0.5 \text{ mm}$  ( $\sigma \sim 212 \mu\text{m}$ ) для  $X$ -координаты, и 4 мм — вдоль проволочек для  $Y$ -координаты. Такое отличие в разрешении для рефлектометра приемлемо. Получена скорость счета 160  $\text{kHz/cm}^2$ . Измеренная нестабильность счета во времени была в пределах 1% в течение 12 ч. На гамма-источниках  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$  показано, что чувствитель-



**Рис. 8.** *a* — принцип Multi-Blad: размещение пластинок с тонкопленочным конвертором из карбида бора под малым углом к траектории нейтрона с небольшим перекрытием (жалюзи); *b* — способ реализации принципа на MWPC [13].

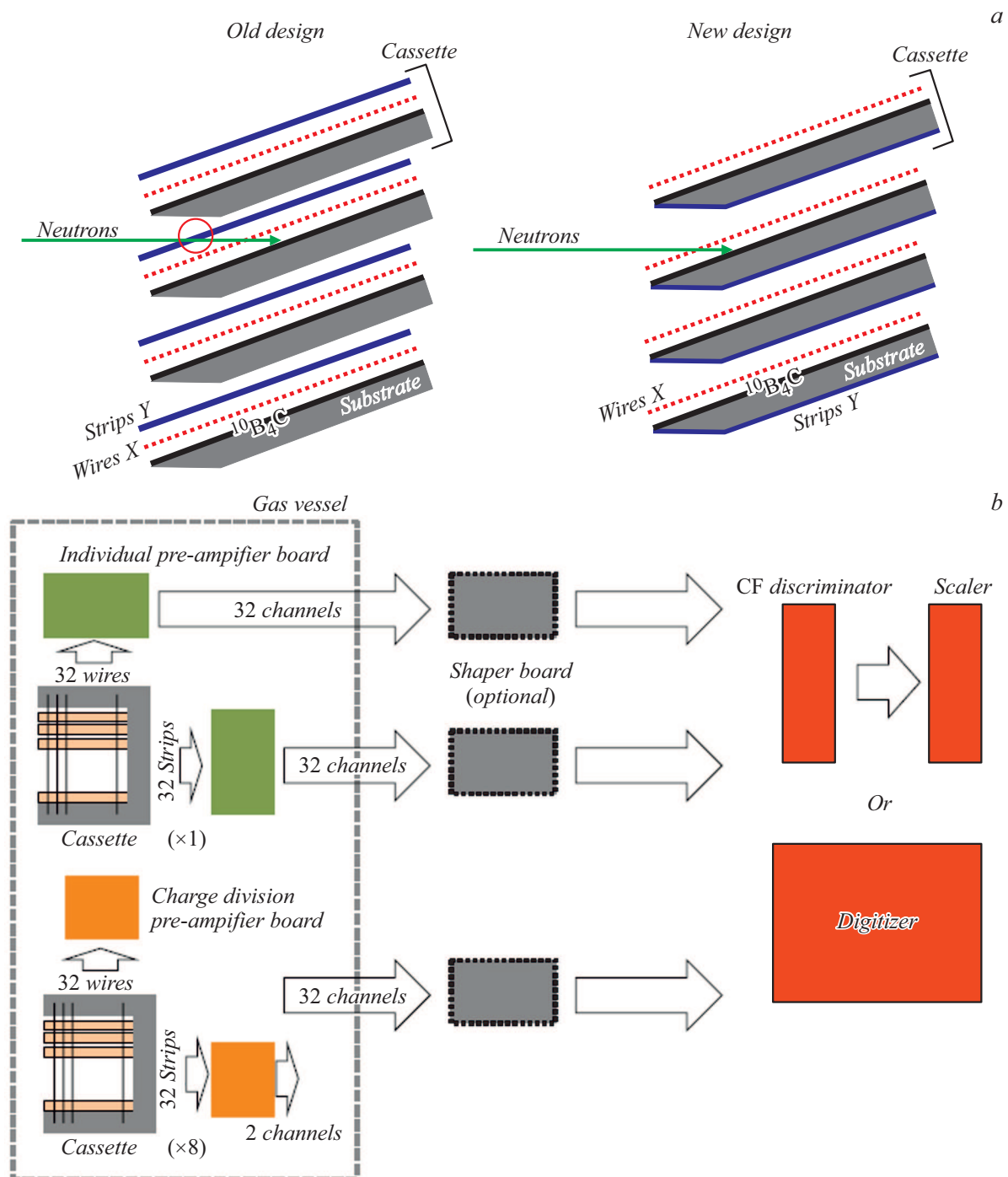
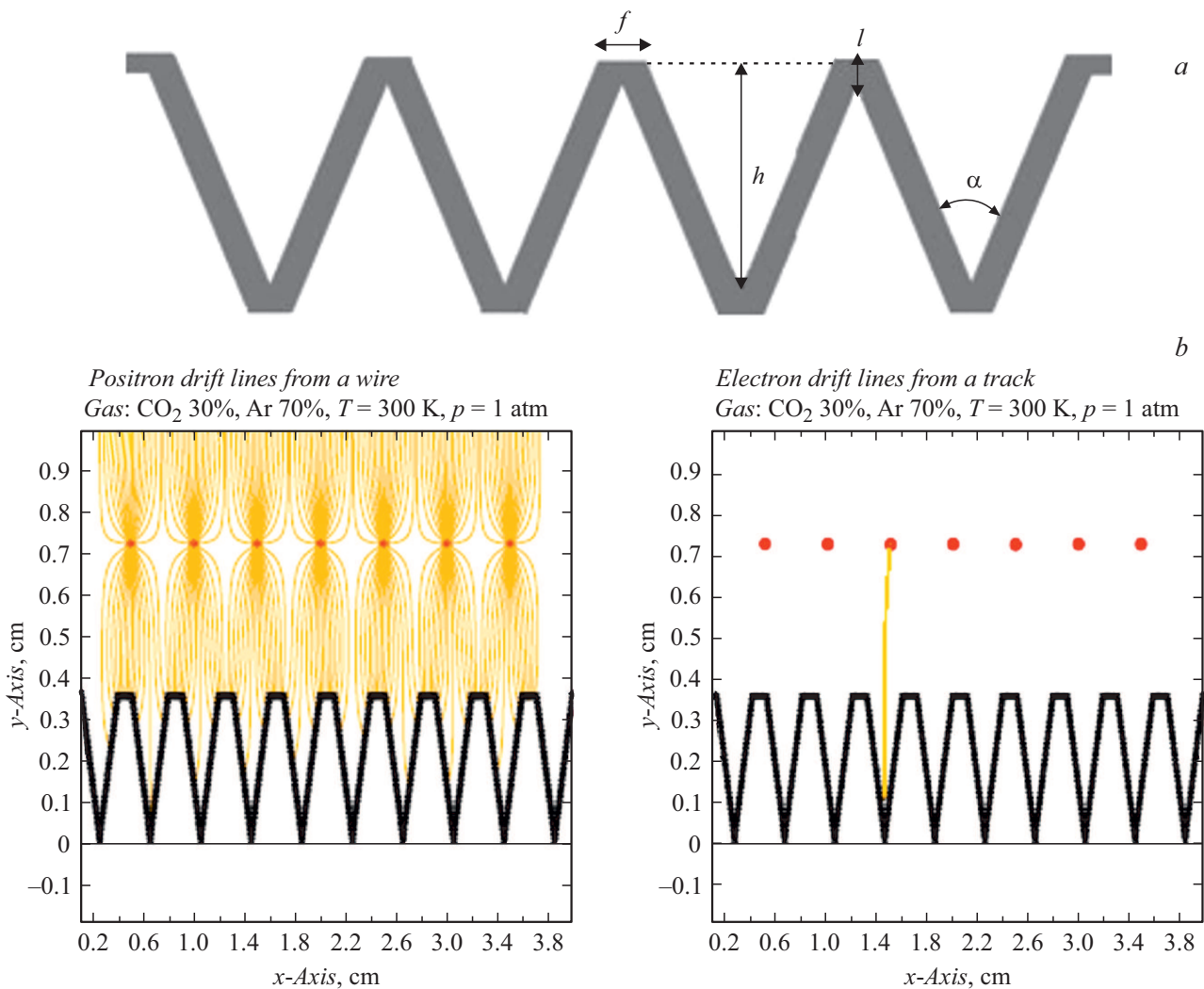


Рис. 9. *a* — улучшенный способ реализации принципа Multi-Blad; *b* — две схемы съема координатной информации [13].

ность к гамма-фону в диапазоне энергий от нескольких keV до 1 MeV меньше  $10^{-8}$  при пороге 100 keV при эффективности регистрации нейтронов с длиной волны  $\lambda = 4.2 \text{ \AA}$ , составляющей 56%. Предполагается заменить алюминиевые пластины-подложки, на которые нанесен карбид бора, на титановые для улучшения указанных характеристик. Для увеличения быстродействия детектора предполагается производить считывание сигналов в каждом канале индивидуально — 64 канала с кассеты против 4 каналов в варианте определения координат

делением заряда (рис. 9, *b*). Необходимо подчеркнуть, что быстродействие  $\sim 10^6 \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  является предельным для MWPC.

В работах [17,18] представлена конструкция двухкоординатного детектора ТХН, в которых пленка карбида бора  $^{10}\text{B}_4\text{C}$  толщиной  $3 \mu\text{m}$  нанесена на V-образную поверхность алюминиевой подложки, выполненной штамповкой. Такая поверхность названа макроструктурной с углом при вершине  $2\alpha = 45^\circ$ . Структурированная поверхность является одним из катодов MWPC (рис. 10).



**Рис. 10.** MWPC, одним из катодов которой является структурированная подложка с тонким слоем конвертора из карбида бора  $^{10}\text{B}_4\text{C}$  [17].

В работе [17] изучалось влияние высоты структурированной подложки  $h$  и толщины пленки конвертора на характеристики детектора при изменении  $h$  в широких пределах от 0.25 до 5 mm. Высота структуры  $h$  влияет на длину пути дрейфа первичных электронов от точки захвата нейтрона ядром бора до анодной проволоочки, что в конечном счете определяет временное разрешение камеры. Для дифрактометров ESS это важно, так как отбор нейтронов с необходимой длиной волны производится по времени пролета.

Показано, что выигрыш в эффективности по сравнению с плоской (неструктурированной) подложкой составляет 40%. В качестве рабочего газа в работе применялась двухкомпонентная смесь Ar/CO<sub>2</sub> (70%/30%) при атмосферном давлении на продув. Для того чтобы с углом при вершине  $2\alpha = 45^\circ$  получить эффективную толщину конвертора  $t_{\text{эф}} = 40 \mu\text{m}$ , детектор должен содержать не менее пяти MWPC в одном газовом объеме [18].

## Позиционно-чувствительные детекторы на газонаполненных микроstriповых счетчиках MSGC

Микроstriповый детектор MSGC (Micro-Strip Gaseous Counter) широко применяется с гелиевым конвертором [19] с 1988 года. Этот детектор в 100 раз быстрее MWPC, так как положительные ионы в 100 раз быстрее покидают промежуток анод–катод, образованный на стеклянной подложке печатным способом. Кроме того, MSGC позволяет получить субмиллиметровое пространственное разрешение.

Впервые геометрия жалюзи с малым углом входа нейтрона в пленку конвертора из карбида бора  $^{10}\text{B}_4\text{C}$  была предложена именно для MSGC в работе [20] в 2005 году для проекта MILAND (рис. 11). Особенность MSGC — пластинки механически самоподдерживающиеся, в то время как в MWPC нужны U-образные рамки для натяжения проволоочек разомкнутые со стороны

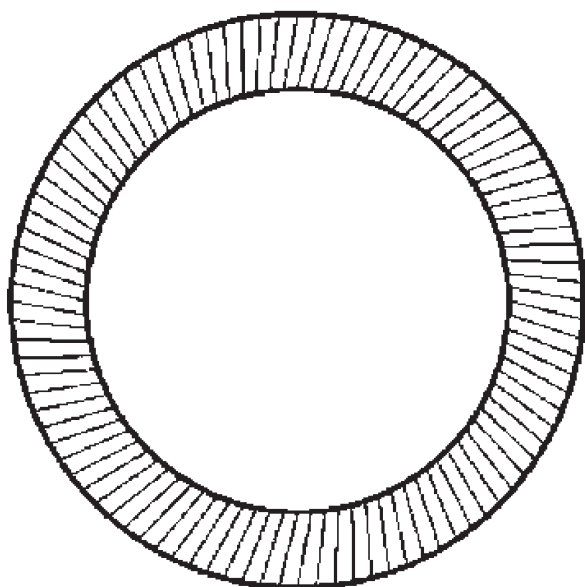


Рис. 11. Геометрия жалюзи на паре пластинок конвертор-MSGC [20].

входа нейтронов. Расстояние между пластинками на внутреннем радиусе 9.7 mm, на внешнем — 12.5 mm. При угле наклона пластинок  $12^\circ$  относительно траектории нейтрона в пять раз увеличивается эффективная толщина пленки конвертора. Пластинка MSGC и пластина с конвертором составляют „строительный“ элемент конструкции 4- $\pi$ -детектора.

## Применение для регистрации ТХН микроструктурных детекторов нового поколения MPGD

В составе MPGD<sup>6</sup> выделяются два основных класса детекторов:

- GEM<sup>7</sup> с разновидностями [21];
- MicroMeGas с разновидностями [22] — устоявшаяся аббревиатура от MicroMesh Gaseous, другое краткое обозначение — MM.

Оба класса MPGD способны заменить MSGC, так как превосходят последние по быстрдействию и надежности.

На рис. 12 (в отличие от рис. 10) представлен вариант структурированной подложки, названной в работе [23] микроструктурной с высотой гребней  $150\ \mu\text{m}$  и с углами при их вершине  $2\alpha = 15^\circ$  или  $2\alpha = 20^\circ$ . На микроструктурную подложку напылен слой  $2\ \mu\text{m}$  тонкопленочного конвертора  $^{10}\text{B}$  (в другом варианте —  $4\ \mu\text{m}$ ). Детектором заряженных частиц-фрагментов реакции (1)

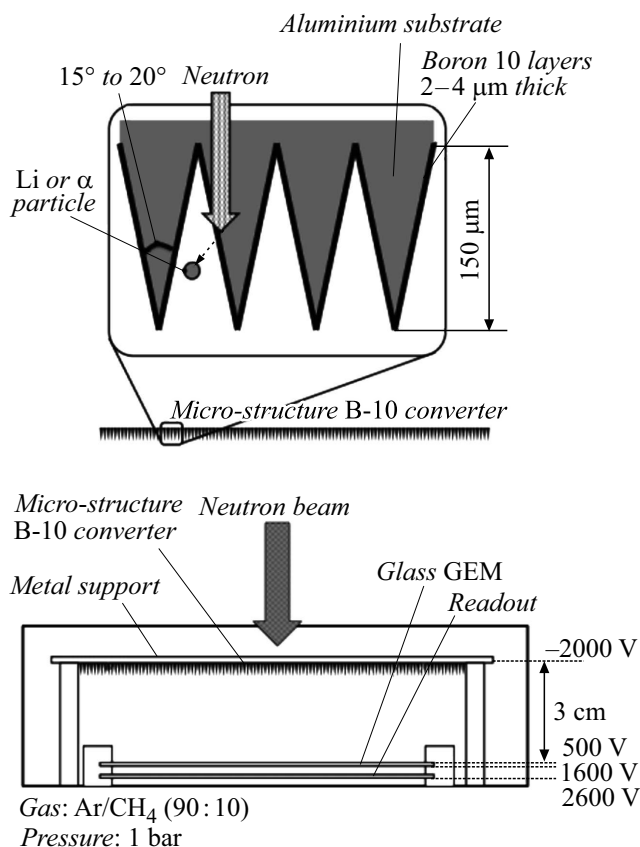


Рис. 12. *a* — микроструктурированная алюминиевая подложка с нанесенным на ее поверхность тонкопленочным конвертором  $^{10}\text{B}$  толщиной 2–4  $\mu\text{m}$ ; *b* — детектор ТХН на GEM [23].

является GEM  $100 \times 100\ \text{mm}$ , выполненный на стекле. Это важно — применен материал, не содержащий водорода<sup>8</sup> Рабочий (дрейфовый) зазор составляет 3 cm. Напряженность поля в зазоре  $400\ \text{V/cm}$ . Напряженность поля между двумя электродами GEM  $2\ \text{kV/cm}$ , при этом внутри отверстий напряженность в несколько раз выше, что обеспечивает усиление  $\sim 20$ . На рис. 13 представлены амплитудные спектры сигналов от тепловых нейтронов и гамма-излучения, полученные на детекторе при указанном усилении на слое конвертора  $2\ \mu\text{m}$  с углами при вершине структуры  $2\alpha = 15^\circ$ . Нетрудно видеть, что эффективная толщина конвертора составляет  $t_{\text{eff}} \approx t_1/\alpha = 15\text{--}30\ \mu\text{m}$  при физической  $t_1 = 2\text{--}4\ \mu\text{m}$ , что достигается с одной микроструктурной подложкой, в отличие от рис. 10 с пятью MWPC.

Такое техническое решение PSD предложено для рефлектометров и приборов малоуглового рассеяния нейтронов для импульсного источника нейтронов J-PARC, как альтернатива гелиевому детектору. Временное разрешение такого детектора с GEM, наполненным смесью Ar/CH<sub>4</sub> (90/10) и работающим при атмосферном давлении, на порядок выше, чем у гелиевого детектора с высоким давлением. Энергия тепловых нейтронов

<sup>8</sup> Водород сильно рассеивает нейтроны.

<sup>6</sup> <http://mpgd.web.cern.ch/mpgd/>

<sup>7</sup> Не путать аббревиатуру GEM — General Materials Diffractometer (дифрактометр на реакторе ISIS) с устоявшейся в англоязычной литературе аббревиатурой GEM — Gaseous Electron Multiplier.



( $\lambda = 1.8 \text{ \AA}$ ) определялась этим детектором по времени пролета с высокой точностью.

Оригинальным является детектор CASCADE [24,25], который выполнен на классическом GEM [21] на фольгированном с двух сторон каптоне толщиной  $50 \mu\text{m}$ . Сквозные отверстия диаметром  $70 \mu\text{m}$  размещены в гексагональной геометрии с шагом  $140 \mu\text{m}$ . Детектор выполнен из двух идентичных по устройству половинок с каскадом из трех GEM в каждой половинке, как показано на рис. 14. Бор, обогащенный до 99% изотопом  $^{10}\text{B}$ , нанесен в виде пленки толщиной  $t_1 = 1.2\text{--}1.4 \mu\text{m}$  на катоды и на обе стороны GEM за исключением последнего GEM в каскаде. Последний GEM через индукционный зазор передает заряд электронов на общий считывающий электрод. Суммарная толщина конвертора получается  $\sim 15 \mu\text{m}$ . Все GEM в каскаде работают в ионизационном режиме без усиления, а последний — с небольшим усилением 10–30. Первичный заряд транспортируется от точки образования до последнего GEM, где усиливается, а затем собирается на пэдах платы считывания,

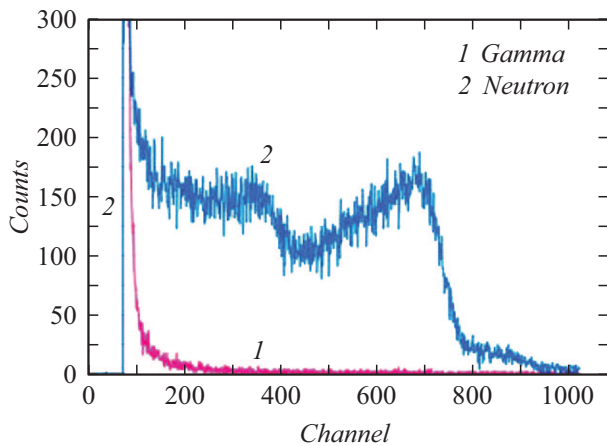


Рис. 13. Амплитудные спектры от тепловых нейтронов и гамма-излучения для толщины пленки конвертора  $2 \mu\text{m}$  с углом при вершине микроструктурной подложки  $2\alpha = 15^\circ$  [23]. Внизу гамма, сверху нейтроны.

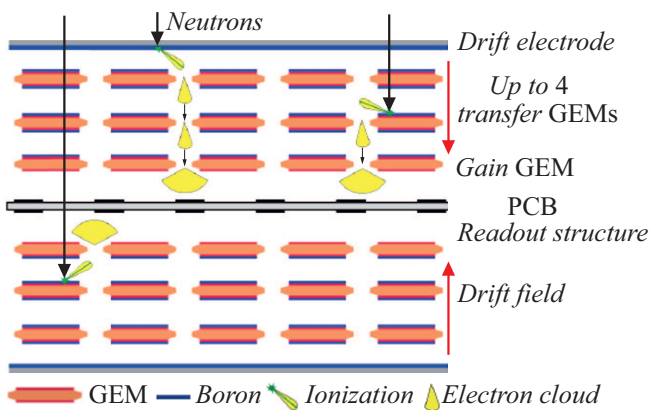


Рис. 14. Детектор TXH CASCADE, выполненный на тонкопленочном конверторе  $^{10}\text{B}$  [24].

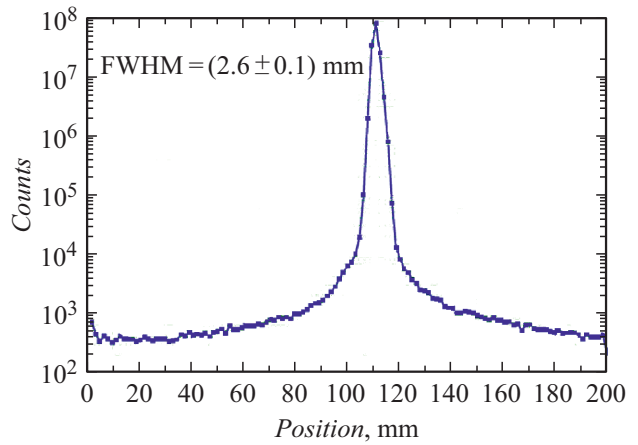


Рис. 15. Распределение ошибок измерения пространственной координаты в детекторе CASCADE и полученное пространственное разрешение [24].

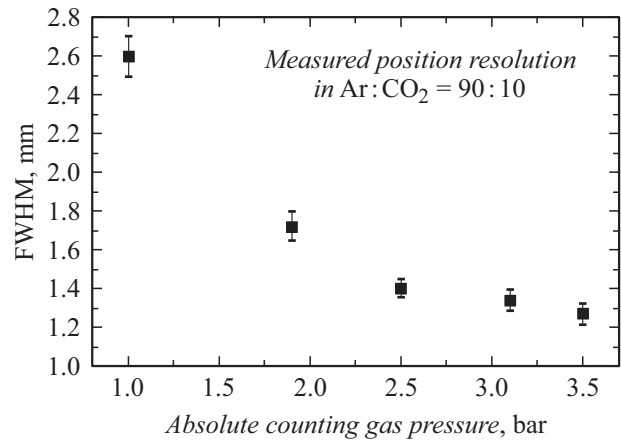


Рис. 16. Пространственное разрешение детектора CASCADE как функция давления газовой смеси [24].

выполняющих функцию анода структуры. Сигналы на пэдах наводятся электронами без дефицита.<sup>9</sup>

Быстродействие детектора CASCADE достигает  $10^7 \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ . Хотя электропроводность чистого бора  $\sim 10^6 \Omega \cdot \text{m}$ , накопления заряда на его поверхности не происходит, так как бор нанесен поверх меди. Результаты измерения пространственного разрешения позиционно-чувствительного детектора CASCADE приведены на рис. 15. Как видно, в приведенном распределении есть хвосты. При необходимости пространственное разрешение детектора можно улучшить увеличением давления газа за счет сокращения пробега продуктов реакции (1), как показано на рис. 16.

В работе [2] приведен другой вариант устройства детектора CASCADE. Новизна — в измерении наклона трека для улучшения пространственной локализации

<sup>9</sup> Дефицит возникает тогда, когда время интегрирования много меньше времени сбора полного заряда, например, в MWPC и MSGC из-за этого регистрируется  $\sim 10\%$  заряда.

точки захвата нейтрона ядром  $^{10}\text{B}$ . Для этого вводится измерение времени дрейфа первичных электронов. Благодаря однородному размещению отверстий GEM в плоскости XY можно с хорошей точностью измерить координаты точки, из которой фрагменты реакции (1) выходят из пленки конвертора в газ. Измерения, выполненные в работе [25], дали рекордно высокое для нейтронов пространственное разрешение  $235 \pm 25 \mu\text{m}$  ( $\sigma = 100 \pm 15 \mu\text{m}$ ) (рис. 17). Обычное измерение координат по центру тяжести заряда, образованного фрагментами в газе, дает разрешение на порядок хуже (рис. 15).

В работе [2] получено пространственное разрешение  $\sigma = 115 \pm 8 \mu\text{m}$  с применением технологии In-Grid — одной из разновидностей ММ.

В работе [26] произведено сравнение пространственного разрешения Triple-GEM и Single-GEM.

В последние годы существенно повышена надежность Single-GEM введением резистивного собирающего электрода из алмазоподобного углерода (Diamond

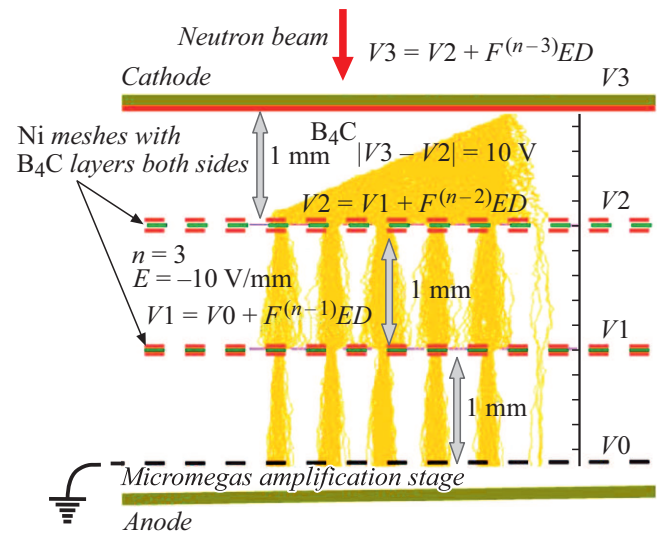


Рис. 18. Многослойный детектор ТХН с применением ММ [28].

Like Carbon, DLC). Новый умножитель работает без индукционного зазора с отверстиями колодезного типа с быстродействием до  $10^7 \text{ s}^{-1}/\text{cm}^{-2}$  с достаточно большим усилением [27].

Микроструктурный детектор ММ столь же популярен в физике высоких энергий, как и GEM. Выше приводилась ссылка на  $\mu\text{-TPC}$ ,<sup>10</sup> которая была успешно выполнена на ММ.

На рис. 18 приведена схема демонстрационного детектора ТХН [28] с применением ММ, которая позволила получить эффективность 50% ММ. Тонкопленочный конвертор  $^{10}\text{B}_4\text{C}$  ( $1\text{--}2 \mu\text{m}$ ) был нанесен на катод и на две микросетки из никеля, отстоящие от катода и друг от друга на расстояние 1 мм. Очевидно, что число сеток можно увеличить.

### Заключение

Для регистрации ТХН тонкопленочный изотоп бора  $^{10}\text{B}$  является хорошей альтернативой резко подорожавшему газовому конвертору  $^3\text{He}$ . На карбиде бора  $^{10}\text{B}_4\text{C}$ , обогащенном изотопом  $^{10}\text{B}$ , строится значительная часть нейтронных дифрактометров ESS. Стоимость детектора ТХН с карбидом бора  $^{10}\text{B}_4\text{C}$  получается существенно меньшей, чем гелиевого при одинаковой эффективности.

Широко распространенным позиционно-чувствительным детектором является тонкостенная строу-трубка с покрытием катода карбидом бора, работающая при атмосферном давлении. Интересным техническим решением является трубка диаметром 4.5 мм в форме звездочек, что исключает мертвые зоны между трубками в блоке

<sup>10</sup> Такая камера называется  $\mu\text{-TPC}$  (Micro Time Projection Chamber), см. Golabek C., et al.  $\mu\text{-TPC}$  detector for the characterization of low energy neutron fields // arXiv:1203.2443v1.

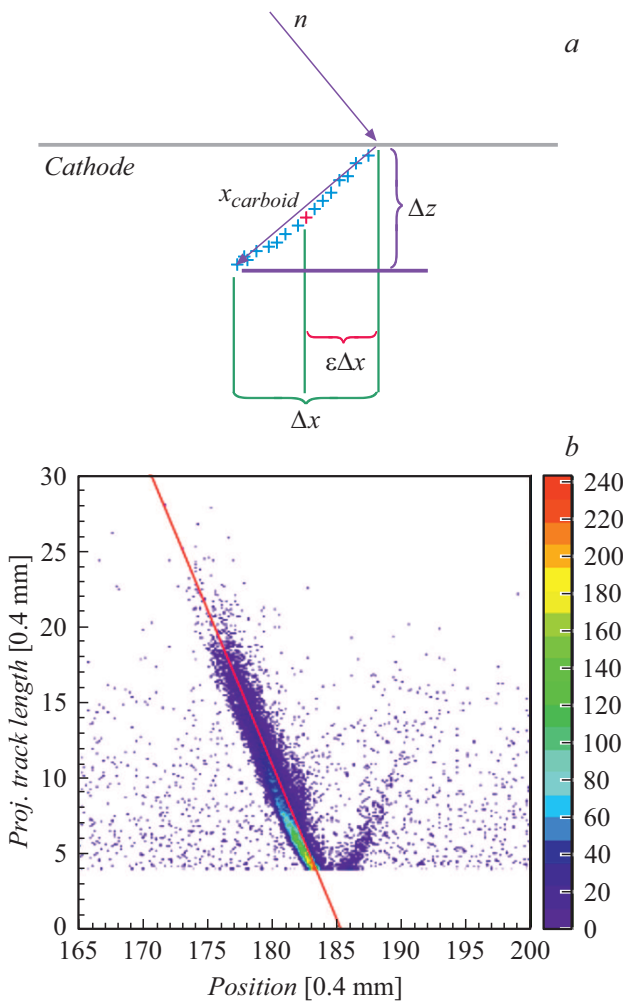


Рис. 17. а — схема измерения и результаты регистрации координаты точки захвата теплового нейтрона по выходу заряженной частицы из пленки конвертора  $^{10}\text{B}$  с использованием GEM-детектора [25].

из многих трубок. Отмечается исключительно высокая надежность запаиваемой трубки. К недостаткам следует отнести невысокое пространственное разрешение  $\sim 5$  mm как вдоль трубки, так и поперек. На порядок лучшее пространственное разрешение как в поперечном, так и в продольном направлениях обеспечивается проволочной камерой MWPC с карбидом бора  $^{10}\text{B}_4\text{C}$ , нанесенном на катод.

Успешно применяются в дифракционных приборах микростриповые детекторы MSGC. Для них характерно на два порядка более высокое быстродействие по сравнению с MWPC и на порядок лучшее пространственное разрешение поперек стрипов. Регистрация первичной световой вспышки в рабочем зазоре детектора позволяет измерять три координаты на треках (3D-реконструкция события).

Перспективными детекторами являются микроструктурные детекторы GEM, способные заменить MSGC, так как превосходят их по надежности и быстродействию.

Преимуществом MM над MSGC и GEM является то, что здесь исключено накопление зарядов на поверхности (нет диэлектрика, как в MSGC и GEM), и, как следствие, можно получить высокую стабильность счета.

## Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, Соглашение № 075-02-2018-260 от 26 ноября 2018 г., уникальный идентификационный номер проекта RFMEFI60718X0200. Шифр заявки 2018-14-000-0001-024.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Кацук А., Левицкая О. ЖТФ. 2020. Т. 90. Вып. 4. С. 519–539.
- [2] Höglund C., Zeitelhack K., Kudejova P., Jensen J., Greczynski G., Lu J., Hultman L., Birch J., Hall-Wilton R. // *Radiation Phys. Chem.* 2015. Vol. 113. P. 14–19.
- [3] Köhli M., Desch K., Gruber M., Kaminski J., Schmidt F.P., Wagner T. // *Nucl. Instr. Meth.* A828. 2016. P. 242–249.
- [4] Convert P., Forsyth J.B. *Position-Sensitive Detection of Thermal Neutrons*. London: Academic Press, 1983. 429 p. [https://inis.iaea.org/search/search.aspx?num=10&orig\\_q=source%3a%22ISBN+0-12-186180-5%22&lang=en-US&login=false&user=External&src=ics&sort=date:D:L:d1&start=0](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?num=10&orig_q=source%3a%22ISBN+0-12-186180-5%22&lang=en-US&login=false&user=External&src=ics&sort=date:D:L:d1&start=0)
- [5] Hall-Wilton R. // CREMLIN Workshop, May 13–16, 2018, St. Petersburg. [https://indico.frm2.tum.de/event/65/sessions/294/attachments/202/333/180513\\_PNPIInstr\\_10BDetectors\\_RJHW-reduced-size.pdf](https://indico.frm2.tum.de/event/65/sessions/294/attachments/202/333/180513_PNPIInstr_10BDetectors_RJHW-reduced-size.pdf)
- [6] Lacy J.L., Athanasiades A., Martin C.S., Sun L., Vazquez-Flores G.L. // *IEEE Trans. NS* 2013. Vol. 60. N 2. P. 1140–1146. <http://doi.org/10.1109/NSSMIC.2011.6154533>
- [7] Piscitelli F., Van Esch P. // *JNST.* 2013. Vol. 8. P. 04020 2013.
- [8] Van der Ende B.M., Rand E.T., Erlandson A., Li L. // *Nucl. Instr. Meth. A.* 894. 2018. P.138–144.
- [9] Xie Z., Zhou J., Song Y., Sun L., Sun Z., Hu B., Chen Y. // arXiv:1611.07615. 2016.
- [10] Piscitelli F., Buffet J.C., Clergeau J.F., Cuccaro S., Guerard B., Khaplanov A., La Manna Q., Rigal J.M., Van Esch P. // *JNST.* 2014. Vol. 9. P. 03007.
- [11] Guerard B., Buffet J. // Patent US Patent App. 13/038, 915, N 20110215251. <https://patentimages.storage.googleapis.com/54/45/a7/6c07ac4c63bb62/US20110215251A1.pdf>
- [12] Piscitelli F. Boron-10 layers, Neutron Reflectometry and Thermal Neutron Gaseous Detectors. Theses PhD. 2013. 186 p. [https://www.ill.eu/fileadmin/user\\_upload/ILL/1\\_About\\_ILL/List\\_of\\_PhD\\_thesis/Piscitelli\\_PhDthesis\\_c.pdf](https://www.ill.eu/fileadmin/user_upload/ILL/1_About_ILL/List_of_PhD_thesis/Piscitelli_PhDthesis_c.pdf)
- [13] Piscitelli F., Buffet J.C., Clergeau J.F., Cuccaro S., Guerard B., Khaplanov A., La Manna Q., Rigal J.M., Van Esch P. // arXiv:1312.2473v1
- [14] Piscitelli F., Messi F., Anastasopoulos M., Bryś T., Chicken F., Dian E., Fuzi J., Höglund C., Kiss G., Orban J., Pazmandi P., Rosta L., Robinson L., Schmidt S., Varga D., Zsiros T., Hall-Wilton R. // *JNST.* 2017. Vol. 12. P. 03013.
- [15] Messi F., Mauri G., Piscitelli F. // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2019. Vol. 936. P. 499–500.
- [16] Mauri G., Mauri G., Messi F., Kanaki K., Hall-Wilton R., Karnickis E., Khaplanov A., Piscitelli F. // *JNST.* 2018. Vol. 13. P. 03004.
- [17] Stefanescu I., Abdullahi Y., Birch J., Defendi I., Hall-Wilton R., Höglund C., Hultman L., Seiler D., Zeitelhack K. // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2013. Vol. 727. P. 109–125.
- [18] Stefanescu I., Abdullahi Y., Birch J., Defendi I., Hall-Wilton R., Höglund C., Hultman L., Zee M., Zeitelhack K. // *JNST.* 2013. Vol. 8. P. 12003. arXiv:1309.7789v1
- [19] Oed A. // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1988. Vol. 263. P. 62–68.
- [20] Buffet J.C., Clergeau J.F., Cooper R.G., Darpentigny J., DeLaulany A., Fermon C., Fetal S., Fraga F., Guerard B., Kampmann R., Kastenmueller A., McIntyre G.J., Manzin G., Meilleu F., Millier F., Rhodes N., Rosta L., Schooneveld E., Smith G.C., Takahashi H., Van Esch P., Van Vuure T.L., Zeitelhack K. // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2005. Vol. 554. P. 392–405.
- [21] Sauli F. // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1997. Vol. 386. P. 531–534.
- [22] Giomataris Y., Rebourgeard Ph., Robert J.P., Charpak G. // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1996. Vol. 376. P. 29–35.
- [23] Fujiwara T., Takahashi H., Yamada N.L., Uesaka M. // 2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (2013 NSS/MIC). <https://ieeexplore.ieee.org/document/6829580>
- [24] Klein M., Schmidt C.J. // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2011. Vol. 628. P. 9–18.
- [25] Flierl B., Hertenberger R., Biebel O., Zeitelhack K. // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2016. Vol. 824. P. 528–531.
- [26] Pfeiffer D., Resnati F., Birch J., Hall-Wilton R., Höglund C., Hultman L., Iakovidis G., Oliveri E., Oksanen E., Ropelowski L., Thuiner P. // *JNST.* 2015. Vol. 10. P. 04004.
- [27] Bencivenni G., Oliveira R., Felici G., Gatta M., Giovannetti M., Morello G., Ochi A., Poli Lener M., Tskhadadze E. // *JNST.* 2019. Vol. 14. P. 05014.
- [28] Tsiledakis G., Delbart A., Desforge D., Giomataris I., Papaevangelou T., Hall-Wilton R., Höglund C., Robinson L., Schmidt S., Menelle A., Pomorski M. // *Universe.* 4. 2018. N 12. P. 134. Proceedings of 7th International Conference on New Frontiers in Physics ICNFP-2018. Kolymbari, Crete, Greece.