

## ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И ПОЛЯ

УДК 539.143

# ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ НА ЯДРЕ $^{10}\text{В}$ С ИСПУСКАНИЕМ ТРИТИЯ С ПОМОЩЬЮ КООРДИНАТНОГО ДЕТЕКТОРА

© 2025 г. С. И. Поташев<sup>1,2,\*</sup>, И. В. Мешков<sup>2)</sup>, Ю. М. Бурмистров<sup>1)</sup>, А. И. Драчев<sup>1)</sup>,  
С. Х. Караевский<sup>1)</sup>, А. А. Каспаров<sup>1)</sup>, Е. А. Пермяков<sup>1)</sup>, В. Н. Пономарев<sup>1)</sup>

Поступила в редакцию 01.10.2024 г.; после доработки 01.10.2024 г.; принята к публикации 16.12.2024 г.

Исследуется взаимодействие быстрых нейтронов с ядром  $^{10}\text{В}$  при энергиях от 3 до 7 МэВ с целью выделения реакции с рождением ядра  $^8\text{Ве}^*$  в возбужденном состоянии, которая выделяется на фоне трехчастичной реакции с вылетом ядра  $^3\text{Н}$  и двух  $\alpha$ -частиц. Проведенное моделирование ионизационных потерь вторичных ядер  $^3\text{Н}$  и  $^4\text{Не}$  в твердых и газовых слоях двух позиционно-чувствительных многопроволочных детекторов с чувствительными размерами  $100 \times 100$  и  $50 \times 50$  мм<sup>2</sup> показало, что на диаграммах, построенных из потерь в двух газовых слоях, события локализуются в различных областях. Результат эксперимента с детектором  $100 \times 100$  мм<sup>2</sup> показал возможность выделения реакции с вылетом ядер  $^3\text{Н}$  и  $^8\text{Ве}^*$ .

**Ключевые слова:** быстрые нейтроны, трехчастичная реакция, возбужденное состояние  $^8\text{Ве}^*$ , позиционно-чувствительные детекторы

DOI: 10.31857/S0044002725020089, EDN: GKUSIC

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Распад ядра  $^8\text{Ве}$  представляет интерес для изучения его внутренней структуры, состоящей из ядерных фрагментов [1]. Ядро  $^8\text{Ве}$  распадается преимущественно на две  $\alpha$ -частицы. Однако в ядерных реакциях с образованием ядра  $^8\text{Ве}$  могут вылетать две  $\alpha$ -частицы без образования этого ядра, и поэтому эта реакция является фоновой. Следовательно, важной задачей является нахождение метода выделения в эксперименте тех событий, в которых образуется данное ядро. Например, в работе [1] используется кинематический критерий для ограничения на углы разлета двух ядер  $^4\text{Не}$  для выделения событий с образованием  $^8\text{Ве}$ .

В реакции взаимодействия нейтрона с ядром  $^{10}\text{В}$  при энергиях от 3 до 7 МэВ может образоваться ядро  $^8\text{Ве}$ . При этом, если идентифицировать образование в реакции ядра  $^3\text{Н}$ , то только реакция с вылетом двух  $\alpha$ -частиц без образования  $^8\text{Ве}$  является фоновой реакцией. Полное сечение реакции  $n + ^{10}\text{В} \rightarrow ^3\text{Н} + X$  и идентификация  $^3\text{Н}$  по ионизационным потерям в газовых детекторах было измерено в работе [2], но не исследовалось образование ядра  $^8\text{Ве}$ . Ядро  $^8\text{Ве}$  в основном и возбужденном состоянии может образоваться в реакциях

$n + ^{10}\text{В} \rightarrow ^3\text{Н} + ^8\text{Ве}$  и  $n + ^{10}\text{В} \rightarrow ^3\text{Н} + ^8\text{Ве}^*$ . В первой реакции  $^8\text{Ве}$  распадается на две  $\alpha$ -частицы по сильному взаимодействию. Во второй реакции сначала из  $^8\text{Ве}^*$  испускается  $\gamma$ -квант по электромагнитному взаимодействию с переходом ядра  $^8\text{Ве}$  в основное состояние, а затем  $^8\text{Ве}$  распадается на две  $\alpha$ -частицы. Распад  $^8\text{Ве}^*$  сопровождается в основном испусканием  $\gamma$ -кванта, однако с вероятностью  $\sim 10^{-3} \div 10^{-5}$  [3] возможно испускание электрон-позитронной пары внутриядерной конверсии.

Недавно при образовании возбужденного состояния  $^8\text{Ве}^*$  в реакции взаимодействия протона с ядром  $^7\text{Li}$  было найдено указание на существование нейтральной экзотической частицы, кандидата в частицы темной материи [3]. В зависимости выхода реакции  $^7\text{Li}(p, e^+e^-)^4\text{He} + ^4\text{He}$  от угла разлета электрона и позитрона была обнаружена аномалия, которая находится в противоречии с предсказанием Стандартной модели [4]. Мы предлагаем метод для отбора событий с рождением ядра  $^8\text{Ве}$  с использованием нового позиционно-чувствительного детектора нейтронов на основе слоя  $^{10}\text{В}$  и многопроволочной пропорциональной камеры [5] в реакциях  $n + ^{10}\text{В} \rightarrow ^3\text{Н} + X$ .

## 2. РАСЧЕТЫ ИОНИЗАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ В $^{10}\text{В}$ -ДЕТЕКТОРЕ $100 \times 100$ мм<sup>2</sup>

В лаборатории атомного ядра ИЯИ РАН был создан позиционно-чувствительный детектор

<sup>1)</sup> Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия.

<sup>2)</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия.

\* E-mail: potashev@inr.ru

на основе слоя  $^{10}\text{B}$  и многопроволочной пропорциональной камеры с чувствительными размерами  $100 \times 100 \text{ мм}^2$  [6]. Он использовался как для регистрации пространственного распределения потока тепловых нейтронов, так и для исследования ядерных реакций с ядром  $^{10}\text{B}$  под действием быстрых нейтронов. Он имеет слабую чувствительность к  $\gamma$ -квантам и к фону рассеянных нейтронов. Пространственное разрешение составляет 2 мм по горизонтали и 4 мм по вертикали.

Процедура отбора с использованием корреляции сигналов ионизационных потерь от двух газовых промежутков была осуществлена для идентификации реакций  $n + ^{10}\text{B} \rightarrow ^4\text{He} + ^7\text{Li}$  и  $n + ^{10}\text{B} \rightarrow ^4\text{He} + ^7\text{Li} + \gamma$ . В результате, сравнивая их экспериментальные вклады с расчетными по методу Монте-Карло, было получено соотношение выходов реакций с вылетом  $^7\text{Li}$  и  $^7\text{Li}^*$  в зависимости от максимальной энергии нейтронов [7].

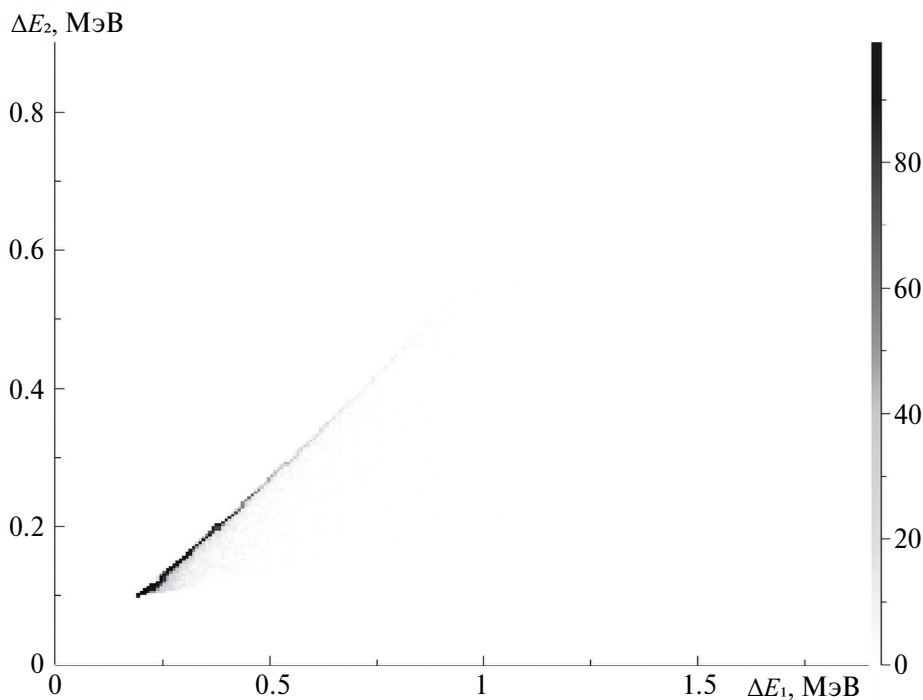
Для моделирования фоновой реакции  $n + ^{10}\text{B} \rightarrow ^3\text{H} + ^4\text{He} + ^4\text{He}$  была разработана программа, которая считывала файл с энергиями и углами вылета  $^3\text{H}$  и одного из ядер  $^4\text{He}$ , предварительно вычисленными из случайных значений углов, соответствующих кинематике этой реакции. При этом сама кинематика трехчастичной фоновой реакции рассчитывалась с использованием программы [8]. Для этих значений энергий и углов вторичных ядер вычислялись ионизационные потери в двух чувствительных

зазорах детектора, и событие принималось, если ядро  $^3\text{H}$  проникало во второй зазор. При этом учитывалось сечение данной реакции. Результат представлен на рис. 1.

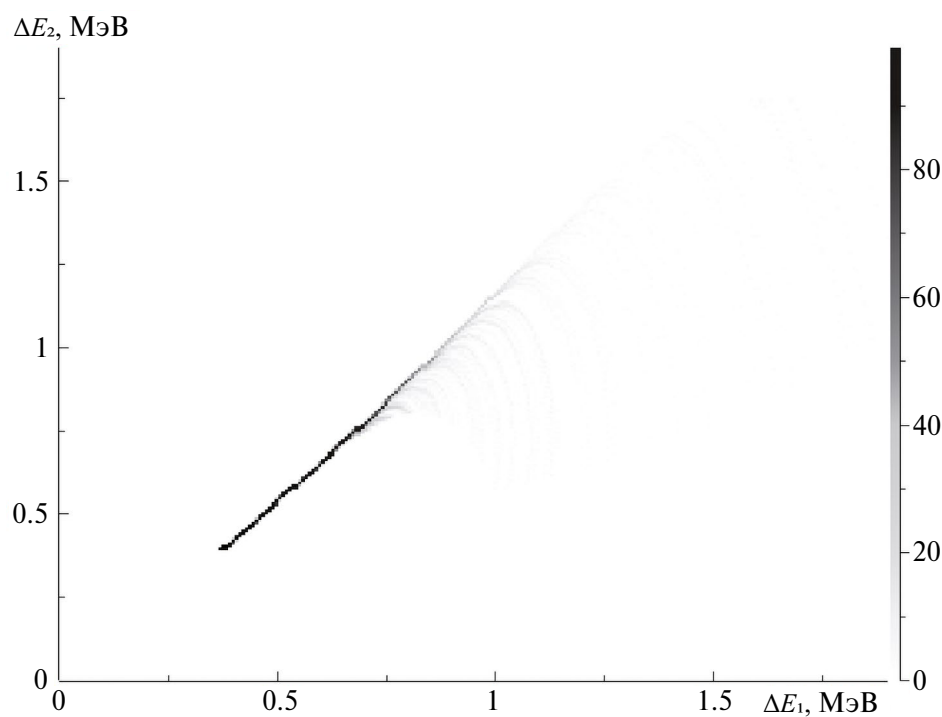
Исследуемая реакция  $n + ^{10}\text{B} \rightarrow ^3\text{H} + ^8\text{Be}(2^+; 0)$  моделировалась как двухчастичная реакция с вычислением кинематики реакции внутри программы. Косинус угла разлета вторичных ядер в с.ц.м. разыгрывался равномерным распределением, для каждого события вычислялись энергии и углы вылета ядер  $^3\text{H}$  и  $^8\text{Be}^*$  и ионизационные потери в двух чувствительных зазорах детектора, и событие принималось, если ядро  $^3\text{H}$  проникало во второй зазор. Результат представлен на рис. 2.

Можно заметить, что область основной части событий для реакции  $n + ^{10}\text{B} \rightarrow ^3\text{H} + ^4\text{He} + ^4\text{He}$  на диаграмме на рис. 1 расположена ниже 0.25 МэВ, в то время как область основной части событий для реакции  $n + ^{10}\text{B} \rightarrow ^3\text{H} + ^8\text{Be}^*$  находится в диапазоне от 0.2 до 0.5 МэВ.

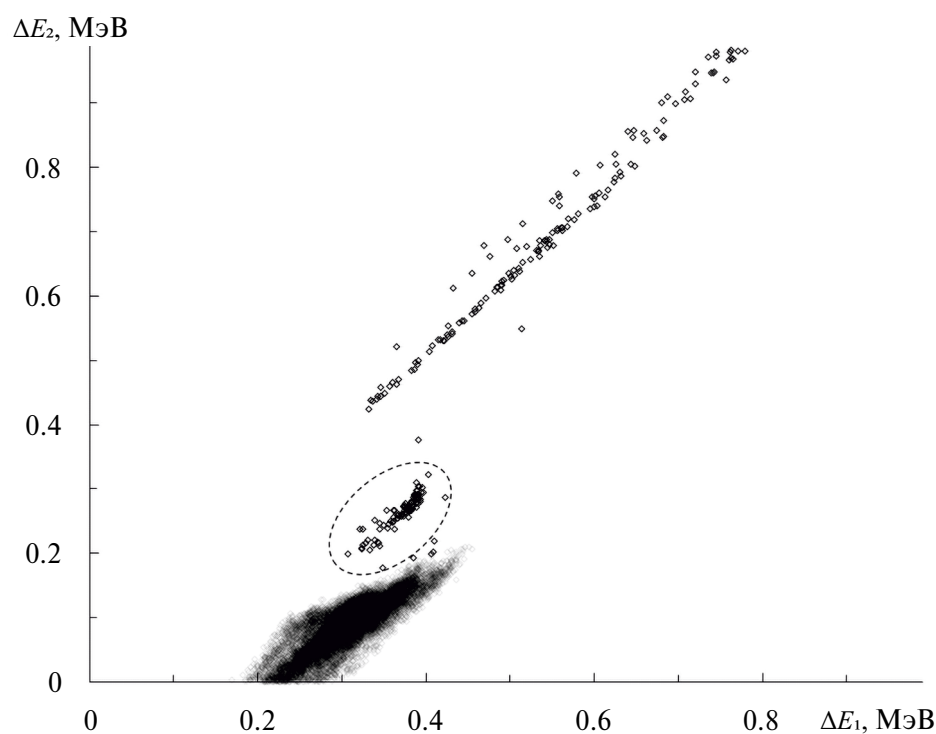
На рис. 3 представлена экспериментальная диаграмма событий из амплитуд сигналов от первого и второго зазоров детектора с чувствительными размерами  $100 \times 100 \text{ мм}^2$ . На ней в области амплитуд до 0.4 МэВ видны два локуса событий, соответствующих этим двум реакциям. Исходя из сравнения экспериментальных и моделированных данных locus в области амплитуд от 0.2 до 0.4 МэВ, выделенный штриховой линией, приписывается реакции  $n + ^{10}\text{B} \rightarrow ^3\text{H} + ^8\text{Be}$ .



**Рис. 1.** Моделированная диаграмма корреляции ионизационных потерь тритона из реакции  $n + ^{10}\text{B} \rightarrow ^3\text{H} + ^4\text{He} + ^4\text{He}$  в двух последовательных зазорах детектора  $100 \times 100 \text{ мм}^2$ .



**Рис. 2.** Моделированная диаграмма корреляции ионизационных потерь тритона из реакции  $n + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^3\text{H} + {}^8\text{Be}^*$  в двух последовательных зазорах детектора  $100 \times 100 \text{ мм}^2$ .



**Рис. 3.** Экспериментальная диаграмма корреляции амплитуд, вызванных заряженными частицами из взаимодействия нейтронов с ядром  ${}^{10}\text{B}$  в двух последовательных зазорах детектора  $100 \times 100 \text{ мм}^2$ . Штриховая область соответствует реакции  $n + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^3\text{H} + {}^8\text{Be}$ .

### 3. РАСЧЕТЫ ИОНИЗАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ В $^{10}\text{B}$ -ДЕТЕКТОРЕ $50 \times 50 \text{ мм}^2$

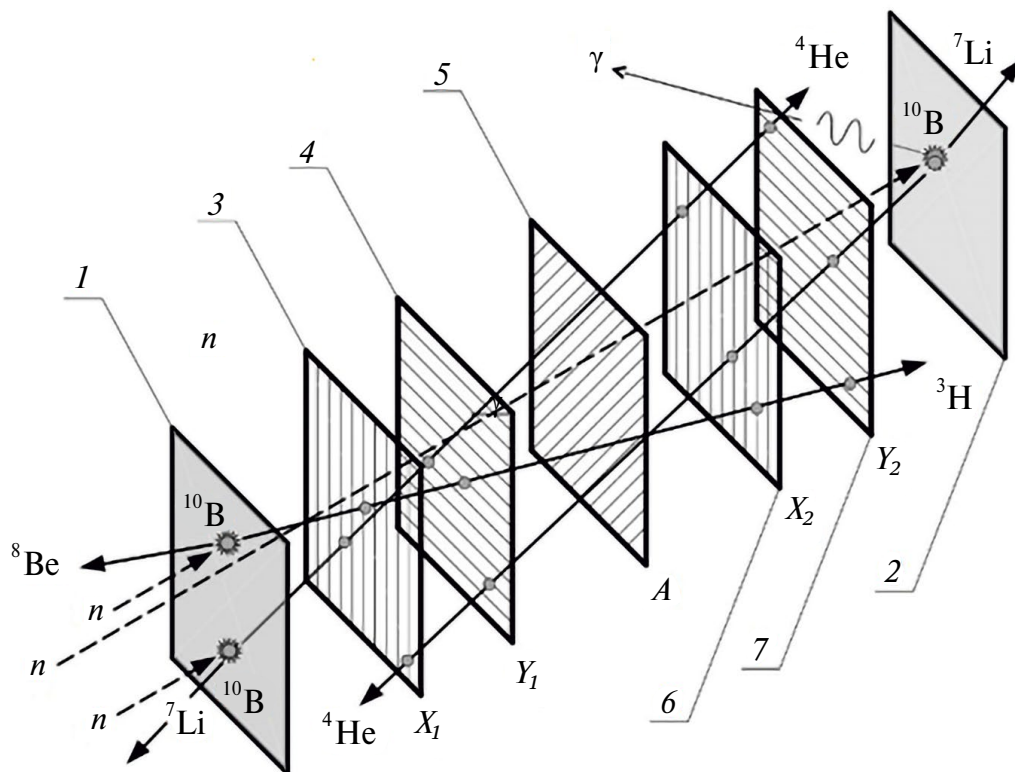
Новый детектор с чувствительными размерами  $50 \times 50 \text{ мм}^2$  [5] имеет пассивный 1.7 мм газовый зазор между 3 мкм слоем  $^{10}\text{B}$  и первым проволочным катодом  $X_1$ , первый активный 2 мм газовый зазор между  $X_1$  и первой сеткой  $Y_1$ , второй активный 4 мм газовый зазор между  $Y_1$  и анодом, третий активный 4 мм газовый зазор между анодом и второй сеткой  $X_2$  и четвертый активный 2 мм газовый зазор между  $X_2$  и вторым катодом  $Y_2$ . Таким образом, могут быть построены  $3 + 2 + 1 = 6$  комбинаций величин ионизационных потерь для идентификации различных выходных каналов реакции при взаимодействии нейтронов с ядром  $^{10}\text{B}$ . Однако в дальнейшем мы будем рассматривать корреляцию суммы потерь в двух первых активных зазорах от суммы потерь в двух последних активных зазорах, заряды в импульсе тока которых собираются на катоде  $X_1$  и сетке  $Y_1$  и, соответственно, сетке  $X_2$  и катоде  $Y_2$ . Схематическая конструкция детектора представлена на рис. 4.

При моделировании ионизационных потерь от вылетающих ядер фоновой реакции  $n + ^{10}\text{B} \rightarrow ^3\text{H} + ^4\text{He} + ^4\text{He}$  можно получить величины потерь ядра  $^3\text{H}$  в четырех последовательных га-

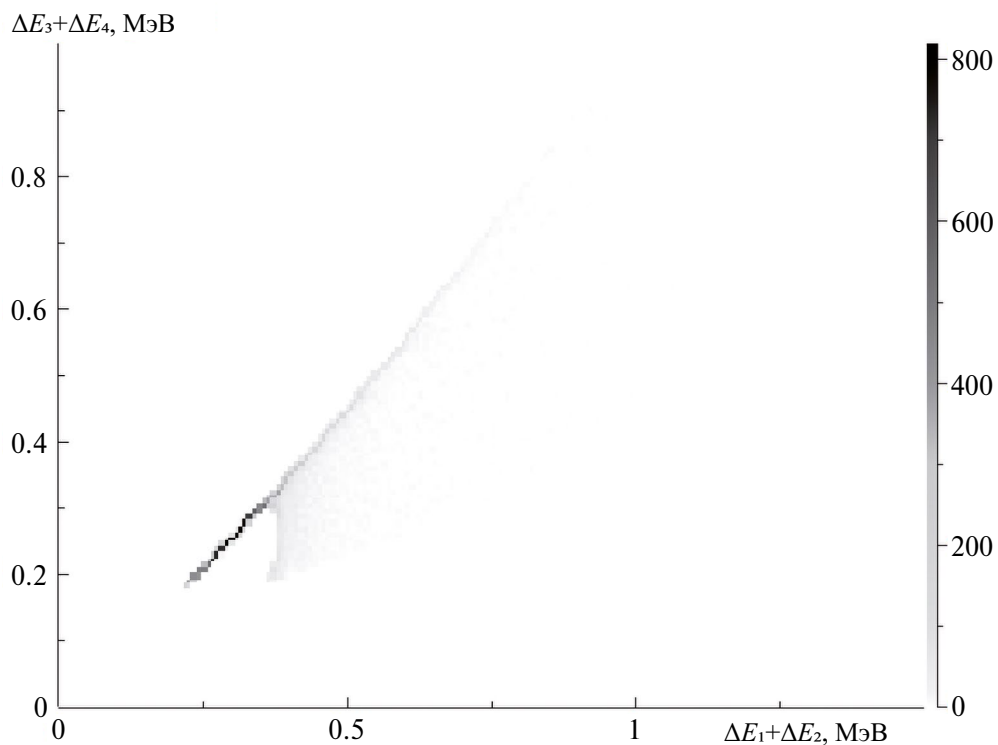
зовых зазорах детектора и попарно их сложить. В то же время энергии ядер  $^4\text{He}$  оказывается недостаточно, чтобы преодолеть  $1.7 + 2 + 4 + 4 = 11.7 \text{ мм}$  газа и вызвать ионизацию в последнем четвертом активном газовом зазоре детектора, сигнал от которого запускает триггер события. Результат расчетов потерь ядра  $^3\text{H}$  из данной реакции представлен на диаграмме на рис. 5.

Исследуемая реакция  $n + ^{10}\text{B} \rightarrow ^3\text{H} + ^8\text{Be}(2^+; 0)$  является двухчастичной, энергии и углы вылета вторичных частиц вычисляются внутри программы. В программе разыгрывался равномерным распределением косинус угла вылета ядер в с.ц.м. и вычислялись аналитически для каждого события энергии и углы вылета ядер  $^3\text{H}$  и  $^8\text{Be}^*$  в л.с. из законов сохранения энергии и импульса. Затем вычислялись ионизационные потери в четырех чувствительных зазорах детектора, и событие принималось, если ядро  $^3\text{H}$  проникало в последний четвертый зазор. Корреляция суммы ионизационных потерь в первых двух зазорах и суммы потерь в двух последних зазорах представлена на диаграмме на рис. 6.

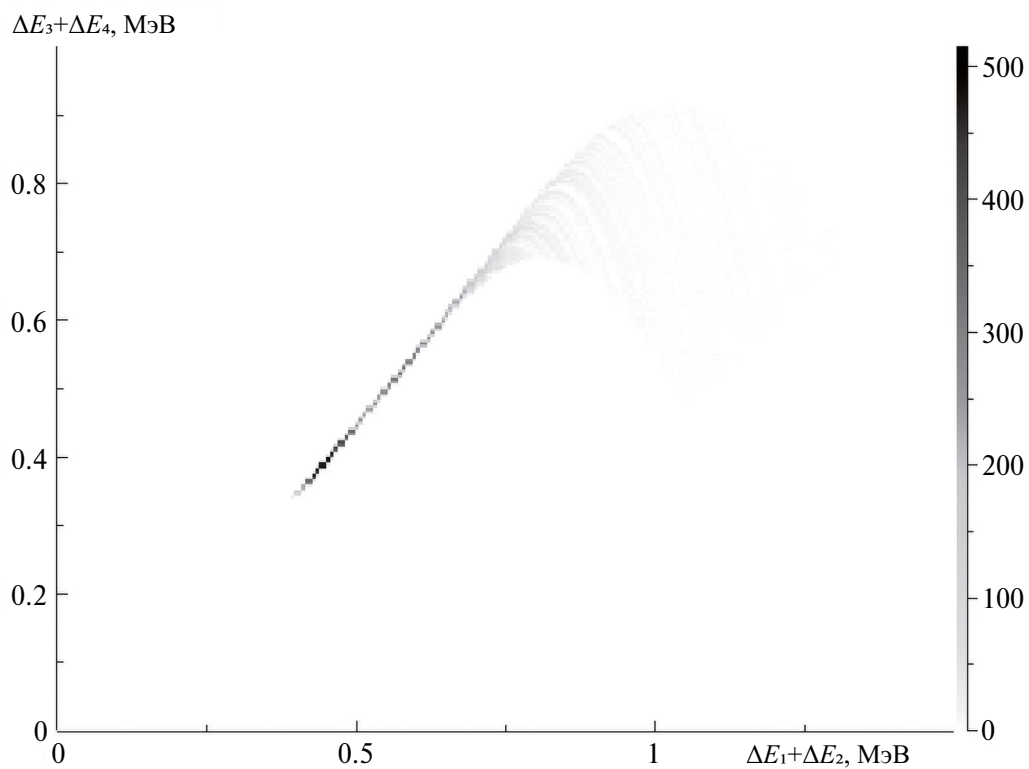
Разница в локализации событий на рис. 5 и рис. 6 для двух реакций оказывается еще более выраженной, чем для детектора  $100 \times 100 \text{ мм}^2$ .



**Рис. 4.** Позиционно-чувствительный детектор нейтронов с чувствительными размерами  $50 \times 50 \text{ мм}^2$ : 1 и 2 — слои  $^{10}\text{B}$  на подложках из кремния; 3 и 4 —  $\text{Al}_2\text{O}_3$  керамика-стеклотекстолитовые рамки с проволочками сетки координат  $X_1$  и  $Y_1$ ; 5 — рамка с 20 мкм проволочками анода A; 6 и 7 — рамки с проволочками сетки координат  $X_2$  и  $Y_2$ .



**Рис. 5.** Моделированная диаграмма корреляции ионизационных потерь тритона из реакции  $n + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^3\text{H} + {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$  суммы от двух первых и суммы от двух последних зазоров детектора  $50 \times 50 \text{ мм}^2$ .



**Рис. 6.** Моделированная диаграмма корреляции ионизационных потерь тритона из реакции  $n + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^3\text{H} + {}^8\text{Be}^*$  суммы от двух первых и суммы от двух последних зазоров детектора  $50 \times 50 \text{ мм}^2$ .

## 4. ВЫВОДЫ

Предложен метод выделения событий рождения ядра  $^8\text{Be}$  в реакции взаимодействия нейтрона с ядром  $^{10}\text{B}$  на фоне трехчастичной реакции с вылетом ядра  $^3\text{H}$  и двух  $\alpha$ -частиц по измерению корреляции ионизационных потерь в двух и более чувствительных газовых зазорах пропорциональной камеры. Локализация событий с образованием ядра  $^8\text{Be}$  в выделенной области диаграммы корреляции подтверждается в эксперименте с детектором  $100 \times 100 \text{ мм}^2$ . Разница в локализации событий для двух реакций для нового детектора  $50 \times 50 \text{ мм}^2$ , содержащего два слоя  $^{10}\text{B}$  и проволочную систему из двух катодов и двух сеток, оказывается более выраженной, чем для детектора  $100 \times 100 \text{ мм}^2$  с двумя зазорами. Поэтому он обладает увеличенной эффективностью и селективностью к исследуемой реакции.

В дальнейшем это позволит расширить круг исследований структуры легких ядер, в частности ядра  $^8\text{Be}$ ; исследовать вклады переходов различной мультипольности в легких ядрах; исследовать кластерную структуру легких ядер, например,  $^9\text{Be}$ ,  $^{10}\text{B}$ ,  $^{11}\text{B}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ ; а также выполнить поиск экзотической частицы X17, интерпретируемой как “фотон темной материи”.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 6 “Ядерная и радиационная физика”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ф. Г. Лепехин, Б. Б. Симонов, ЯФ **68**, 2101 (2005) [Phys. At. Nucl. **68**, 2039 (2009)].
2. М. Карабова, Д. А. Артеменков, В. Браднова, С. Вокал, А. Вокалова, Я. Врлакова, П. И. Зарубин, И. Г. Зарубина, А. Д. Коваленко, А. И. Малахов, Г. И. Орлова, П. А. Рукояткин, В. В. Русакова, С. П. Харламов, Т. В. Щедрина, ЯФ **72**, 329 (2009) [Phys. At. Nucl. **72**, 300 (2009)].
3. A. J. Krasznahorkay, M. Csatlós, L. Csige, Z. Gácsi, J. Gulyás, M. Hunyadi, I. Kuti, B. M. Nyakó, L. Stuhl, J. Timár, T. G. Tornyi, Zs. Vajta, T. J. Ketel, and A. Krasznahorkay, Phys. Rev. Lett. **116**, 042501 (2016).
4. J. Kozaczuk, Phys. Rev. D **97**, 015014 (2018).
5. S. I. Potashev, A. A. Afonin, Yu. M. Burmistrov, A. I. Drachev, A. A. Kasparov, S. Kh. Karaevsky, I. V. Meshkov, V. N. Ponomarev, and V. I. Razin, J. Surf. Invest. X-ray **18**, 908 (2024).
6. S. Potashev, A. Drachev, Yu. Burmistrov, S. Karaevsky, A. Kasparov, V. Ponomarev, and G. Solodukhov, EPJ Web Conf. **231**, 05010 (2020).
7. С. И. Поташев, А. А. Каспаров, В. Н. Пономарев, Изв. РАН. Сер. физ. **86**, 1304 (2022) [Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. **86**, 1079 (2022)].
8. С. В. Зуев, А. А. Каспаров, Е. С. Конобеевский, Изв. РАН. Сер. физ. **81**, 753 (2017) [Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. **81**, 679 (2017)].

## STUDY OF REACTIONS INDUCED BY FAST NEUTRONS ON $^{10}\text{B}$ NUCLEUS WITH TRITIUM EMISSION USING COORDINATE DETECTOR

© 2025 S. I. Potashev<sup>1,2)</sup>, I. V. Meshkov<sup>2)</sup>, Yu. M. Burmistrov<sup>1)</sup>, A. I. Drachev<sup>1)</sup>, S. Kh. Karaevsky<sup>1)</sup>, A. A. Kasparov<sup>1)</sup>, E. A. Permyakov<sup>1)</sup>, V. N. Ponomarev<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2)</sup> P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

The interaction of fast neutrons with the  $^{10}\text{B}$  nucleus at energies from 3 to 7 MeV is studied with the aim of isolating the reaction with the production of the  $^8\text{Be}^*$  nucleus in an excited state. This reaction stands out from the three-body reaction with the emission of triton and two  $\alpha$ -particles. Simulation of ionization losses of secondary  $^3\text{H}$  and  $^4\text{He}$  nuclei in solid and gas layers of position-sensitive multiwire detectors with sensitive sizes both a  $100 \times 100$  and  $50 \times 50 \text{ мм}^2$  showed that events are localized in different areas in diagrams plotted from losses in two gas layers. Experimental result with  $100 \times 100 \text{ мм}^2$  detector showed the possibility of isolating a reaction with the emission of  $^3\text{H}$  and  $^8\text{Be}^*$  nuclei.