

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УСТАНОВКИ С ПАРНЫМ СПЕКТРОМЕТРОМ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ С ЛЕГКИМИ ЯДРАМИ НА ИСТОЧНИКЕ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ

*С. Х. Караевский¹, С. И. Поташев^{1,2}, К. Ю. Бурмистров¹,
Ю. М. Бурмистров¹, А. А. Каспаров^{1,*}, Е. А. Пермяков¹,
В. Н. Пономарев¹, В. И. Разин¹, А. Н. Сахаров¹*

¹ Институт ядерных исследований РАН, Москва, 117312, Россия

² Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Россия

Исследуются характеристики установки, включающей позиционно-чувствительный детектор нейтронов с исследуемым ядром ^{10}B и пропорциональной камерой размерами 50×50 мм и парный спектрометр электронов и позитронов внутренней конверсии кремниевых и сцинтилляционных NaI-детекторов. Установка предназначена для изучения реакций с легкими ядрами на источниках быстрых нейтронов с энергией свыше 1 МэВ на базе линейных ускорителей электронов и протонов ИЯИ РАН. Показаны возможности выделения различных реакций с вылетом легких ядер, в частности ^3H и ^4He .

Characteristics of an experimental setup including a position-sensitive neutron detector with nucleus ^{10}B of interest and a proportional chamber with dimensions of 50×50 mm and an internal conversion electron and positron pair spectrometer based on silicon and NaI scintillation detectors are investigated. The setup will be used for studying reactions with light nuclei on fast neutron sources based on linear electron and proton accelerators of INR RAS at above 1 MeV. Selection possibility of various reactions with light nucleus emission, in particular ^3H and ^4He , was demonstrated.

PACS: 25.40.–h; 25.40.Hs

ВВЕДЕНИЕ

Легкие ядра, например ^{10}B , ^{11}B , ^9Be , ^8Be , ^{12}C , ^{16}O , обладают ярко выраженной кластерной структурой. Их составляющими являются дейтоны, тритоны и α -частицы [1, 2]. Эти ядра играют важную роль в изучении процессов нуклеосинтеза в астрофизике, а также поиска образования экзотических ядер [3]. В нейтроноизбыточных изотопах легких ядер наиболее отчетливо проявляется эффект «нейтронного гало» [4], который

* E-mail: kasparov200191@gmail.com

можно исследовать как теоретически, так и экспериментально, поскольку эти ядра содержат малое число нуклонов и их кластеров.

Одна из интригующих задач заключается в исследовании возбужденных состояний четно-четных ядер с числом нуклонов, кратным четырем и распад которых в ядерных реакциях происходит преимущественно на несколько α -частиц: ${}^8\text{Be}^*$, ${}^{12}\text{C}^*$, ${}^{16}\text{O}^*$ с испусканием фотонов или, альтернативно, e^+e^- -пар внутриядерной конверсии. Недавно, при образовании ядра ${}^8\text{Be}^*$ в реакции $p + {}^7\text{Li} \rightarrow {}^8\text{Be}^*$ и последующем распаде ядра ${}^8\text{Be}^*$ с вылетом e^+e^- -пары внутриядерной конверсии была обнаружена аномалия в распределении событий по углу разлета e^+ и e^- . В предсказании по Стандартной модели эта зависимость должна быть монотонно *падающей* функцией. Однако в эксперименте обнаружен неожиданный максимум в области угла 140° [5]. Было предложено объяснение этой аномалии как проявления рождения и распада новой элементарной частицы — бозона с $J^P = 1^+$ с массой $\sim 16,9$ МэВ [6].

В этих экспериментах использовалась установка, основной целью которой было исследование вкладов электрических и магнитных переходов ядер ${}^8\text{Be}^*$, ${}^{16}\text{O}^*$ в основное состояние с определением коэффициента внутренней конверсии электрон-позитронных пар. В данной работе использовались тонкие 0,5-мм пластмассовые сцинтилляторы для регистрации частичных потерь ΔE и толстых от 2- до 5-см пластмассовых сцинтилляторов NE 102A для регистрации полных потерь электронов и позитронов [7]. Это позволяло идентифицировать электрон, позитрон или γ -квант, если отсутствовал сигнал в тонком детекторе. Однако энергетическое разрешение составляло $\sim 12\%$, а угловое разрешение было невысоким, поскольку определялось размерами сцинтилляторов от 2 до 4 см. Для одновременного измерения энергии и углового распределения электронов и позитронов с целью изучения мультипольных ядерных переходов создана установка из шести $\Delta E - E$ пластмассовых сцинтилляционных телескопов [8]. С целью поиска экзотических бозонов, распадающихся на электрон и позитрон, была создана установка, включающая в себя дрейфовые камеры и пластмассовые сцинтилляторы [9].

В Институте ядерных исследований РАН была создана установка для изучения взаимодействия нейтронов с энергией свыше 1 МэВ с легкими ядрами [10], в частности с ядром ${}^{10}\text{B}$, в котором детектируется не только пара электрона и позитрона, как в предыдущих работах, но и координаты одного из вылетающих ядер, например, ${}^3\text{H}$ или ${}^4\text{He}$, и тем самым идентифицируется интересующая нас реакция. Исследование характеристик этой установки, а именно определение формы и амплитуд сигналов, полезных событий и возможности отбора исследуемых реакций, выполнялось на источниках быстрых нейтронов на базе как линейного ускорителя электронов (ЛУЭ-8) с максимальной энергией 9 МэВ, так и линейного ускорителя протонов с энергией 267 МэВ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Установка включает в себя: 1) позиционно-чувствительный детектор нейтронов (ПЧДН) с чувствительной областью 50×50 мм, который имеет два слоя толщиной по 3 мкм каждый, между которыми располагается позиционно-чувствительная многопроволочная пропорциональная камера [11]; 2) парный детектор, состоящий из двух телескопов, каждый из которых содержит позиционно-чувствительный кремниевый детектор (ПЧКД) с чувствительной областью $0,3 \times 50 \times 50$ мм с шагом чувствительных элементов 2 мм и сцинтилляционный детектор NaI полного поглощения диаметром 42 мм и толщиной 46 мм для регистрации как электрона, позитрона или γ -кванта. В результате по регистрируемым в нескольких газовых зазорах ионизационным потерям одного из вторичных ядер определяются координаты точки взаимодействия и распределение этих потерь по толщине газа детектора. Амплитуды сигналов пропорциональны величинам ионизационных потерь. Анализируя корреляции сигналов, можно идентифицировать вторичное ядро, а сумма амплитуд во всех зазорах дает его энергию. Ранее была показана возможность идентификации реакций с вылетом ядра ^3H или ^4He [12–15]. И, в частности, идентифицируется реакция $n + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^3\text{H} + {}^8\text{Be}^*$, которая представляет особый интерес для исследования вкладов переходов ядра ${}^8\text{Be}^*$ в основное состояние различной мультипольности. Вылетающие из распада ядра ${}^8\text{Be}^*$ электрон-позитронные пары или γ -кванты регистрируются парным спектрометром в совпадении с ядром ${}^3\text{H}$.

СИСТЕМА СЧИТЫВАНИЯ УСТАНОВКИ

Детекторы установки и их система считывания представлены на рис. 1. Проволочки каждой из четырех координатных плоскостей нейтронного детектора объединены по 3 в 8 групп. Сигналы от каждой группы усиливаются восьмиканальным усилителем. Далее сигналы преобразуются в пары дифференциальных сигналов, которые по бронированным кабелям «витая пара» длиной 12 м передаются в цифровой сигнальный процессор (ЦСП) CAEN DT5550. Сигналы от предусилителей кремниевых детекторов суммируются по 4 в 1 канал, а также преобразуются в пары дифференциальных сигналов, которые по бронированным кабелям «витая пара» длиной 12 м передаются в ЦСП. Сигналы от сцинтилляционных детекторов также преобразуются в пары дифференциальных сигналов, которые по бронированным кабелям «витая пара» длиной 12 м передаются в ЦСП. Применение таких кабелей и метода преобразования и передачи дифференциальных сигналов позволяет снизить влияние электромагнитных помех вблизи работающего ускорителя. Для питания кремниевых детекторов использовались разработанные источники питания с напряжениями +6 В, –6 В и напряжения смещения

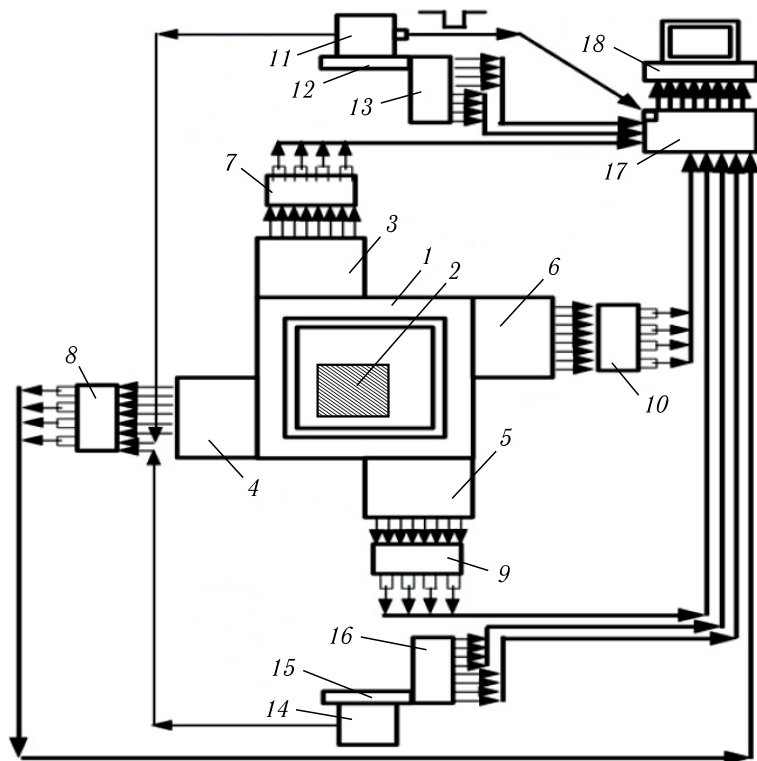


Рис. 1. Детекторы установки и их система считывания: 1 — позиционно-чувствительный детектор нейтронов; 2 — фильтр медленных нейтронов из кадмия толщиной 1 мм; 3–6 — четыре восьмиканальных усилителя; 7–10 — четыре преобразователя сигналов ПЧДН в пары дифференциальных сигналов; 11, 14 — два сцинтилляционных детектора на основе кристаллов NaI; 12, 15 — два позиционно-чувствительных кремниевых детектора для регистрации электрона и позитрона соответственно; 13, 16 — два сумматора четырех каналов в один для ПЧКД; 17 — 32-канальный цифровой сигнальный процессор CAEN DT5550 частотой 80 МГц

+50 В с плавным поднятием и опусканием рабочего напряжения. Все усилители и преобразователи в пары дифференциальных сигналов также были разработаны в ИЯИ РАН.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Экспериментальная установка использовалась в экспериментах на источниках быстрых нейтронов как на базе ЛУЭ-8 с энергией от 7,2 до 9 МэВ, так и линейного ускорителя протонов с энергией 267 МэВ на нейтронном канале РАДЭКС ИЯИ РАН.

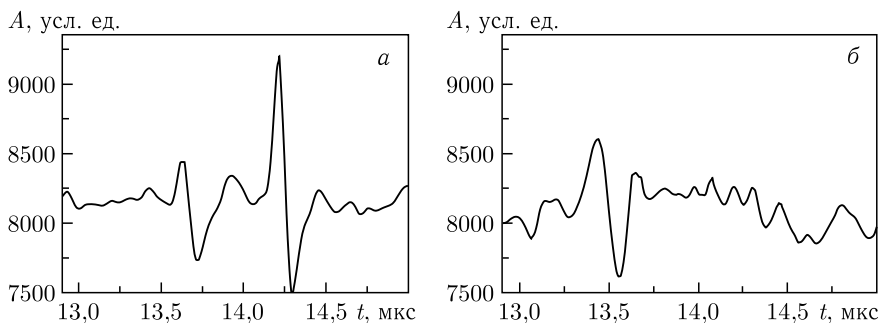


Рис. 2. Формы сигналов, зарегистрированных с двух взаимно перпендикулярных каналов позиционно-чувствительного детектора нейтронов: а) канал № 9, координата X_1 ; б) канал № 1, координата Y_1

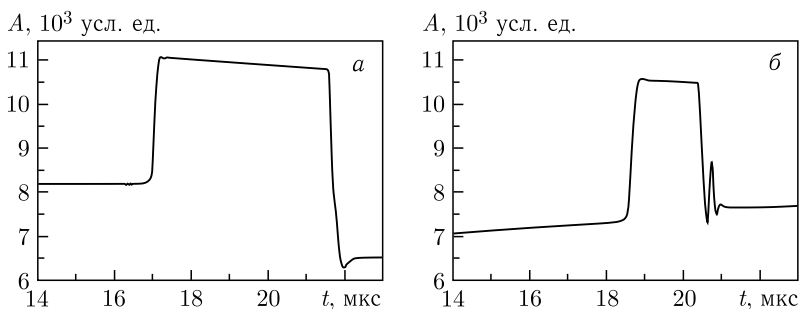


Рис. 3. Формы сигналов, зарегистрированных с одного из каналов кремниевого детектора верхнего плеча (а) и с одного из каналов кремниевого детектора нижнего плеча (б) парного спектрометра

На рис. 2 приведены формы сигналов, зарегистрированных с двух взаимно перпендикулярных каналов позиционно-чувствительного детектора нейтронов. Экспериментально они получены на фотонейтронном источнике на базе ЛУЭ-8.

На рис. 3 приведены формы сигналов, зарегистрированных с одного из каналов кремниевого детектора верхнего плеча и с одного из каналов кремниевого детектора нижнего плеча парного спектрометра. Эти сигналы соответствуют зарегистрированным электронам или позитронам.

На рис. 4 приведены формы сигналов, зарегистрированных со сцинтилляционного детектора верхнего плеча и со сцинтилляционного детектора нижнего плеча парного спектрометра. Все эти вышеприведенные сигналы относятся к событию совпадения всех этих сигналов.

Для того чтобы выделить события, относящиеся к различным ядерным реакциям, необходимо было построить диаграмму корреляции амплитуд сигналов каналов от двух координатных проволоочных плоскостей

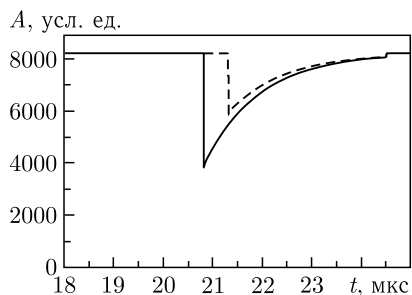


Рис. 4. Формы сигналов, зарегистрированных со сцинтилляционного детектора верхнего плеча (сплошная линия) и со сцинтилляционного детектора нижнего плеча (штриховая линия) парного спектрометра

ПЧДН. Поскольку в эксперименте на линейном ускорителе протонов энергия нейтронов достигает сотен МэВ и наблюдается множество реакций, первые эксперименты проводились на фотонейтронном источнике на базе электронного ускорителя ЛУЭ-8. Максимальная энергия нейтронов при этом с применением бериллиевой мишени составляет около 7 МэВ. Поэтому возможно наблюдение только следующих реакций:



На рис. 5 представлена корреляция сигналов с двух каналов от различных координатных плоскостей позиционно-чувствительного детектора нейтронов при энергии электронов 9 МэВ, т. е. максимально возможной энергии нейтрона 7,2 МэВ.

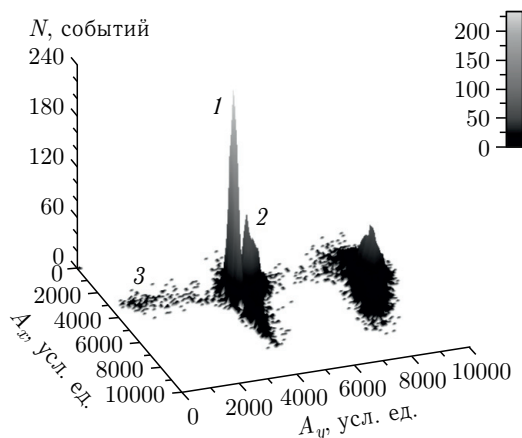


Рис. 5. Корреляция сигналов с двух каналов от различных координатных плоскостей позиционно-чувствительного детектора нейтронов при энергии электронов 9 МэВ. Области, отмеченные 1, 2 и 3, соответствуют реакциям (1)–(3)

Ранее расчетным и экспериментальным способом [14, 15] было показано, что разные области событий на рис. 5 соответствуют локализации событий из реакций (1)–(3).

Из указанных реакций (3) представляет наибольший интерес из-за возможности исследования вкладов переходов ядра ${}^8\text{Be}^*$ в основное состояние различной мультипольности. Кроме того, поскольку возможен распад ядра ${}^8\text{Be}^*$ на две α -частицы с испусканием e^+e^- -пары и, как было сказано во введении про указание на обнаружение аномалии в распределении событий по углу разлета e^+ и e^- в реакции $p + {}^7\text{Li}$, становится возможным проведение альтернативного эксперимента в нейтронных потоках. Попытка такого эксперимента была сделана на нейтронном канале РАДЭКС ИЯИ РАН, и в настоящее время ведется обработка экспериментальных данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана установка для изучения реакций взаимодействия нейтронов с легкими ядрами и с регистрацией пары электрона и позитрона внутренней конверсии. Она включает в себя позиционно-чувствительный детектор нейтронов и, одновременно, мишень, а также спектрометр пар электронов и позитронов. Эксперименты по исследованию взаимодействия быстрых нейтронов с ядром ${}^{10}\text{B}$ были выполнены на нейтронном источнике на базе линейного ускорителя электронов с энергией до 9 МэВ и на нейтронном канале РАДЭКС на линейном ускорителе протонов ИЯИ РАН при энергии протонов 267 МэВ. Определены формы и длительности сигналов составляющих установку детекторов. Показана возможность выделения событий, отвечающих различным ядерным реакциям.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление №6 «Ядерная и радиационная физика».

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zarubin P. I.* “Tomography” of the Cluster Structure of Light Nuclei via Relativistic Dissociation // *Clusters in Nuclei*. V. 3. Lecture Notes Phys. 2014. V. 875. P. 51–93.
2. *Lombardo I., Dell’Aquila D.* Clusters in Light Nuclei: History and Recent Developments // *Riv. Nuovo Cim.* 2023. V. 46. P. 521–618.
3. *Penionzhkevich Y. E.* Exotic Nuclei in Astrophysics // *Phys. Part. Nucl.* 2012. V. 43, No. 4. P. 452–473.
4. *Maurin D., Ferronato Bueno E., Derome L.* A Simple Determination of the Halo Size from ${}^{10}\text{Be}/{}^9\text{Be}$ Data // *Astron. Astrophys.* 2022. V. 667. P. A25.

5. *Krasznahorkay A.J., Csatló M., Csige L., Gacsi Z., Gulyas J., Hunyadi M., Kuti I., Nyako B.M., Stuhl L., Timar J., Tornyi T.G., Vajta Zs., Ketel T.J., Krasznahorkay A.* Observation of Anomalous Internal Pair Creation in ^8Be : A Possible Indication of a Light Neutral Boson // *Phys. Rev. Lett.* 2016. V. 116, No. 4. P. 042501.
6. *Kozaczuk J.* Dark Photons from Nuclear Transitions // *Phys. Rev. D.* 2018. V. 97, No. 1. P. 015014.
7. *Stiebing K.E., de Boer F.W.N., Frohlich O., Bokemeyer H., Muller K.A., Bethge K., van Klinken J.* A Multi-Detector Array for High Energy Nuclear e^+e^- Pair Spectroscopy // *J. Phys. G.* 2004. V. 30, No. 2. P. 165–180.
8. *Gulyas J., Ketel T.J., Krasznahorkay A.J., Csatló M., Csige L., Gacsi Z., Hunyadi M., Krasznahorkay A., Vitaz A., Tornyi T.G.* A Pair Spectrometer for Measuring Multipolarities of Energetic Nuclear Transitions // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2016. V. 808. P. 21–28.
9. *Blomqvist K.I., Boeglin W.U., Böhm R., Distler M., Edelhoff R., Friedrich J., Geiges R., Jennewein P., Kahrau M., Korn M., Kramer H., Krygier K.W., Kunde V., Liesenfeld A., Merkel H., Merle K., Müller U., Neuhausen R., Offermann E.A.J.M., Pospischil Th., Richter A.W., Rosner G., Sauer P., Schardt S., Schmieden H., Wagner A., Walcher Th., Wolf S.* The Three-Spectrometer Facility at the Mainz Microtron MAMI // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1998. V. 403, No. 2–3. P. 263–301.
10. *Karaevsky S.Kh., Potashev S.I., Burmistrov Yu.M., Kasparov A.A., Permyakov E.A., Ponomarev V.N., Razin V.I.* A Setup for Studying Interactions of Fast Neutrons and Light Nuclei with an Electron–Positron Pair Spectrometer // *Instrum. Exp. Tech.* 2025. V. 68, No. 3. P. 360–365.
11. *Potashev S.I., Afonin A.A., Burmistrov Yu.M., Drachev A.I., Kasparov A.A., Karaevsky S.Kh., Meshkov I.V., Ponomarev V.N., Razin V.I.* Multiwire Position-Sensitive Neutron Detector with Two Layers of Boron-10 // *J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech.* 2024. V. 18, No. 4. P. 908–912.
12. *Potashev S.I., Kasparov A.A., Ponomarev V.N.* Branching Ratio of the ^7Li Ground and Excited States during Interaction between Neutrons with Energies above 1 MeV and ^{10}B Nuclei // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2022. V. 86, No. 9. P. 1079–1082.
13. *Potashev S.I.* Ionization Loss Simulation in Gaps of Fast Neutron Detector Based on ^{10}B Layer and Gaseous Chamber // *Phys. At. Nucl.* 2023. V. 86, No. 5. P. 850–853.
14. *Potashev S.I., Meshkov I.V., Afonin A.A., Burmistrov Yu.M., Drachev A.I., Karaevsky S.Kh., Kasparov A.A., Ponomarev V.N., Razin V.I.* A Study of Reactions with Light Nuclei Using a Position Sensitive Fast Neutron Detector // *Bull. Lebedev Phys. Inst.* 2024. V. 51, No. 9. P. 334–338.
15. *Potashev S.I., Meshkov I.V., Burmistrov Yu.M., Drachev A.I., Karaevsky S.Kh., Kasparov A.A., Permyakov E.A., Ponomarev V.N.* Study of Reactions Induced by Fast Neutrons on ^{10}B Nucleus with Tritium Emission Using Coordinate Detector // *Phys. At. Nucl.* 2025. V. 88, No. 2. P. 383–388.