

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ $^{11}\text{B}(p, \alpha)\alpha$ ПРИ ЭНЕРГИИ ПРОТОНОВ 0,3–2,15 МэВ

*М. И. Бикчурина, Т. А. Быков, Д. А. Касатов,
Е. О. Соколова, С. Ю. Таскаев, А. А. Шуклина¹*

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Достоверные знания о сечении реакции $^{11}\text{B}(p, \alpha)\alpha$ важны для протонной терапии рака, термоядерного синтеза и ядерной астрофизики. Несмотря на актуальность, механизм реакции остается открытым вопросом. Цель исследования состоит в получении новых знаний, актуализации и уточнении имеющихся данных о реакции в диапазоне значений энергии протонного пучка 0,3–2,15 МэВ. Полученные результаты показали, что реакция $^{11}\text{B}(p, \alpha)\alpha$ имеет два канала ($^{11}\text{B}(p, \alpha_1)^8\text{Be}^*$ и $^{11}\text{B}(p, \alpha_0)^8\text{Be}$) с разными сечениями, что согласуется с современными представлениями. В дальнейшем планируется исследовать тонкую борную мишень для измерения сечений реакции каждого канала.

The credible value of the $^{11}\text{B}(p, \alpha)\alpha$ reaction cross section is essential for proton therapy of cancer, thermonuclear fusion, and nuclear astrophysics. Despite the relevance, the mechanism of the reaction is still an open question. The goal of the study consists in acquiring new knowledge about the reaction, modernization and clarification of the preliminary studies data in the 0.3–2.15 MeV proton beam energy range. The obtained results proved that the reaction $^{11}\text{B}(p, \alpha)\alpha$ has two channels ($^{11}\text{B}(p, \alpha_1)^8\text{Be}^*$ and $^{11}\text{B}(p, \alpha_0)^8\text{Be}$) with different cross sections, which agrees with the nowadays conceptions. In future, we plan to study a thin boron target to measure the cross sections of each channel.

PACS: 13.85.Lg; 24.10.–i

ВВЕДЕНИЕ

Достоверные знания о сечении ядерной реакции $^{11}\text{B}(p, \alpha)\alpha$ актуальны для нескольких направлений. Первое — это использование бора как радиосенсибилизатора при проведении протонной терапии. Накопление ^{11}B в раковых клетках с последующим облучением протонами приводит к ядерной реакции с генерацией высокоэнергетичных α -частиц, что позволяет увеличить поглощенную дозу на глубине пика Брэгга при проведении протонной терапии [1]. Второе — это перспектива использования реакции бор-протонного синтеза в термоядерной энергетике. В сравнении

¹E-mail: a.shuklina@g.nsu.ru

с альтернативными реакциями, рассматриваемыми для осуществления управляемого термоядерного синтеза, при производстве энергии с использованием бора отсутствует остаточная радиация и увеличивается количество эффективной энергии, так как реакция $^{11}\text{B}(p, \alpha)\alpha\alpha$ проходит без генерации нейтронов [2]. Третье направление — исследование механизма первичного нуклеосинтеза в рамках ядерной астрофизики [3]. Несмотря на актуальность, физика реакции до сих пор является открытым вопросом [4].

Цель работы заключается в получении новых знаний и актуализации и уточнении имеющихся данных о сечении перспективной реакции $^{11}\text{B}(p, \alpha)\alpha\alpha$ в диапазоне значений энергии протонов 0,3–2,15 МэВ. Для достижения поставленной цели толстая борсодержащая мишень была облучена протонами на ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией в Институте ядерной физики СО РАН (ИЯФ СО РАН). Спектры α -частиц и обратно отраженных протонов, образующихся в результате реакции $^{11}\text{B}(p, \alpha)\alpha\alpha$, были измерены под углом 135° к направлению движения пучка с помощью кремниевого полупроводникового α -спектрометра ПДПА-1К (Институт физико-технических проблем, Дубна). Проведен анализ экспериментальных данных и численное моделирование взаимодействия протонного пучка с борсодержащей мишенью с использованием программного обеспечения SIMNRA version 7.03.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1.1. Ядерная реакция $^{11}\text{B}(p, \alpha)\alpha\alpha$. Ядерная реакция изотопа ^{11}B с протонами протекает в два этапа (рис. 1). При взаимодействии протонов с ^{11}B образуется атом ^{12}C в возбужденном состоянии. ^{12}C распадается на α -частицу и ядро ^8Be в основном или в первом возбужденном состоянии. ^8Be распадается на две α -частицы. В зависимости от того, ^8Be или $^8\text{Be}^*$ распадается на α -частицы, принято выделять α_0 - и α_1 -каналы реакции соответственно [5].

Механизм реакции изучается с 1933 г. с первых работ Олифанта и Резерфорда [6], Гилберта и Ди (1936) [7], но накопившиеся за почти 90 лет данные существенно разнятся. На рис. 2 показана зависимость дифференциального сечения рассеяния от энергий налетающего пучка протонов из базы данных ядерных реакций IBANDL [4, 8, 9]. Приведены результаты рассеяния под углами, близкими к углу 135° , изучаемому в этой работе. Разобщенность данных особенно заметна при малых значениях энергии 0,3–2 МэВ — диапазоне, изучаемом в этой работе.

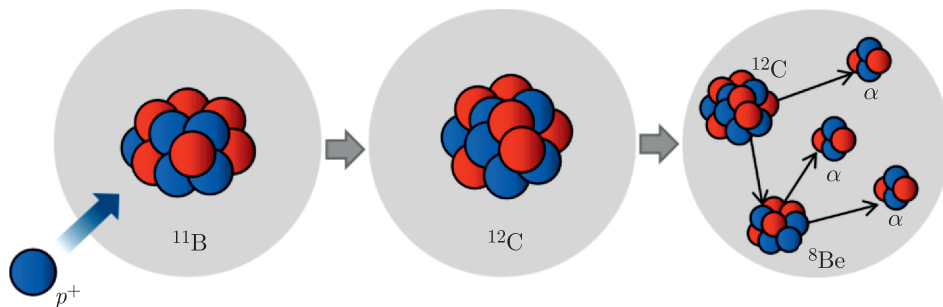


Рис. 1. Схема ядерной реакции ^{11}B с протонами

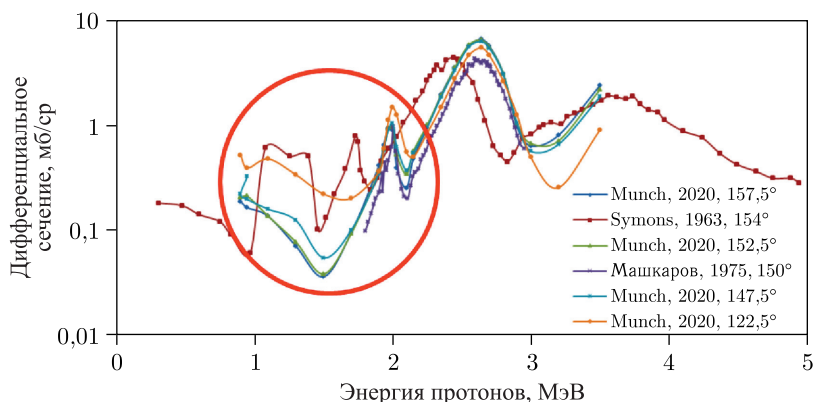


Рис. 2. Данные о сечении реакции $^{11}\text{B}(p, \alpha)\alpha$ из базы данных ядерных реакций IBANDL, кружком обведен исследуемый диапазон

1.2. Экспериментальная установка. Эксперименты проведены на ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией (VITA) в ИЯФ СО РАН. Ускоритель-тандем позволяет получать протоны с энергией от 0,3 до 2,2 МэВ со стабильностью 0,1% с током от 1 мкА до 5 мА со стабильностью 0,4% [10, 11]. Схема установки приведена на рис. 3.

В данной работе в качестве спектрометра α -частиц используется кремниевый полупроводниковый детектор ПДПА-1К.

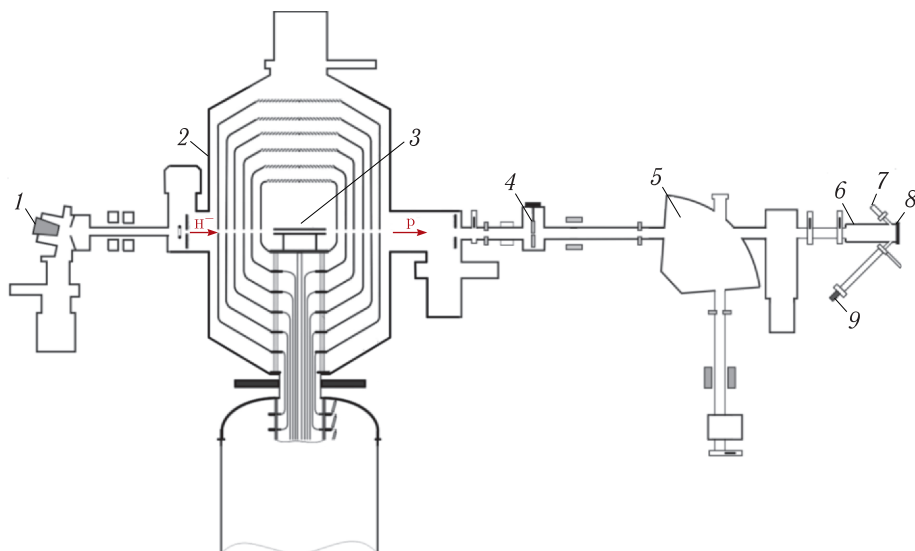


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 — источник ионов; 2 — ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией; 3 — аргоновая мишень; 4 — охлаждаемый коллиматор с апертурой 1 мм; 5 — поворотный магнит; 6 — мишенный узел; 7 — видеокамера; 8 — борсодержащая мишень; 9 — α -спектрометр

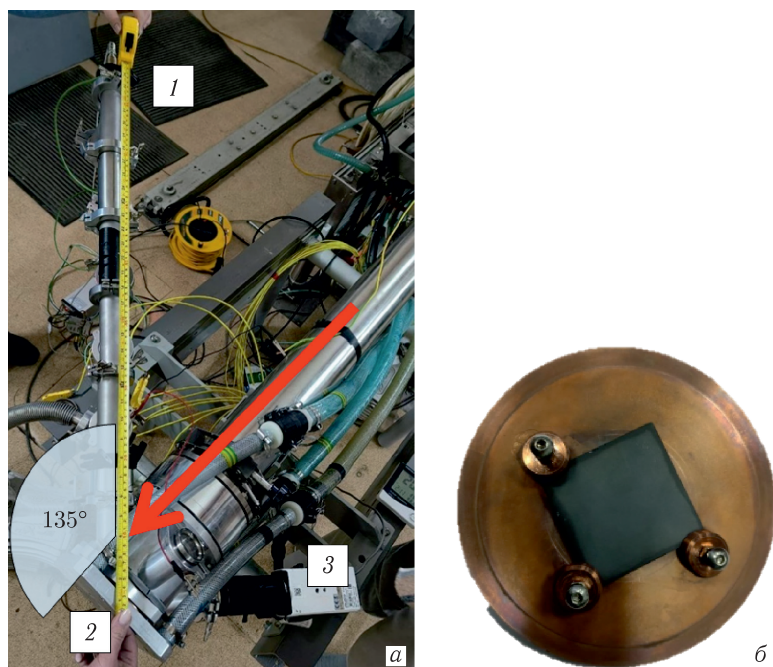


Рис. 4. а) Мишенный узел: 1 — α -спектрометр; 2 — мишень; 3 — видеокамера, стрелкой обозначено направление пучка протонов. б) Борсодержащая мишень, закрепленная на медной подложке

Чувствительная площадь детектора $S = 20 \text{ мм}^2$, энергетическое разрешение 13 кэВ, емкость 30 пФ, энергетический эквивалент шума 6 кэВ, толщина входного окна 150 мкм. При облучении толстой борной мишени протонами чувствительная часть α -детектора находилась на расстоянии 870 мм от борной мишени под углом 135° относительно направления пролета пучка. Телесный угол составляет $\Omega_{\text{lab}} = S/R^2 = 2,64 \cdot 10^{-5}$. Установленный на мишенный узел детектор представлен на рис. 4, а.

Борсодержащая мишень выполнена из карбида бора B_4C . Толщина мишени составляет 4 мм. Протонный пучок с максимальной энергией 2,15 МэВ не проходит мишень насквозь, что позволяет считать мишень толстой.

Пластина из карбида бора была закреплена на охлаждаемой медной подложке (рис. 4, б) и установлена в мишенный узел.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Толстая борсодержащая мишень облучалась протонным пучком в диапазоне значений энергии 0,3–2,0 МэВ с шагом 100 кэВ и 2,05–2,15 МэВ с шагом 50 кэВ на ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией (VITA). При каждом значении энергии данные набирались в течение 10 мин. Параметры пучка и α -спектрометра при измерениях спектров представлены в таблице. Ток пучка на мишени не превышал 10 мкА, мертвое время детектора менее 0,04.

Параметры измерений

Энергия пучка, кэВ	Мертвое время детектора	Ток пучка, мкА
300	0,0003	3,3
400	0,0013	4,5
500	0,0067	5,5
600	0,0129	6,3
700	0,0164	6,0
800	0,0192	6,3
900	0,0202	6,6
1000	0,0265	8,4
1100	0,0241	8,5
1200	0,0230	8,6
1300	0,0238	8,7
1400	0,0246	8,8
1500	0,0280	9,1
1600	0,0290	9,1
1700	0,0295	9,0
1800	0,0330	8,8
1900	0,0344	8,6
2000	0,0357	8,6
2050	0,0435	8,5
2100	0,0381	8,3
2150	0,0405	8,5

Примеры спектров α -частиц и обратно отраженных протонов, регистрируемых при энергиях протонов 400, 700, 1000 и 2000 кэВ, представлены на рис. 5.

Резкую полочку в диапазоне каналов 0–1200 можно интерпретировать как упругое рассеяние на боре и углероде, более низкую плавно спадающую широкую полочку при 1200–3500 — как α_1 -канал реакции, намечающийся подъем при 3500–4500 — как α_0 -канал реакции.

С помощью программного обеспечения SIMNRA [12] был установлен точный состав исследуемой мишени. Экспериментальный и смоделированный спектры представ-

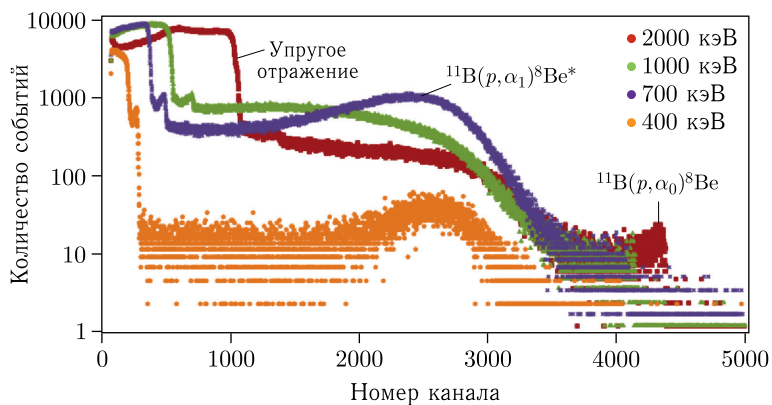


Рис. 5. Спектры α -частиц и обратно отраженных протонов

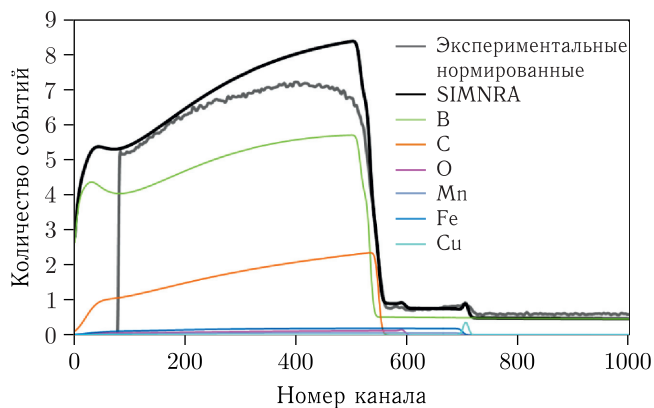


Рис. 6. Результат численного моделирования и экспериментальный спектр α -частиц и обратно отраженных протонов при энергии пучка 1000 кэВ

лены на рис. 6. Показаны вклады от каждого элемента по отдельности. Кроме бора и углерода в мишени присутствуют незначительные примеси железа, марганца и кислорода, что обусловлено способом изготовления пластин. На поверхности мишени находится небольшое количество оксида бора и меди.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Толстая борсодержащая мишень облучена пучком протонов 0,3–2,15 МэВ на ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией (VITA) в ИЯФ СО РАН. Измерены спектры α -частиц и обратно отраженных протонов при взаимодействии протонного пучка с толстой борной мишенью. В экспериментальных спектрах наблюдаются α -частицы с энергией, которые мы интерпретируем как α_1 - и α_0 -частицы из реакций $^{11}\text{B}(p, \alpha_1)^8\text{Be}^*$ и $^{11}\text{B}(p, \alpha_0)^8\text{Be}$ соответственно. Полученные результаты подтверждают, что реакция $^{11}\text{B}(p, \alpha)\alpha$ имеет два канала ($^{11}\text{B}(p, \alpha_1)^8\text{Be}^*$ и $^{11}\text{B}(p, \alpha_0)^8\text{Be}$) с различными сечениями, что соотносится с современными представлениями. Установлен точный состав исследуемой мишени с помощью SIMNRA version 7.03. В дальнейшем планируется исследовать тонкую борную мишень для измерения сечений реакции каждого канала.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-72-30005).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cirrone G.A.P., Manti L., Margarone D., Petringa G., Giuffrida L., Minopoli A., Picciotto A., Russo G., Cammarata F., Pisciotto P., Perozziello F.M., Romano F., Marchese V., Milluzzo G., Scuderi V., Cuttone G., Korn G.* First Experimental Proof of Proton Boron Capture Therapy (PBCT) to Enhance Proton Therapy Effectiveness // *Sci. Rep.* 2018. V. 8, No. 1. P. 1–15.
2. *Belloni F.* On a Fusion Chain Reaction via Suprathermal Ions in High-Density H- ^{11}B Plasma // *Plasma Phys. Controlled Fusion.* 2021. V. 63, No. 5. P. 055020.
3. *Lamia L., Spitaleri C., Burjan V., Carlin N., Cherubini S., Crucilla V., Gameiro Munhoz M., Gimenez Del Santo M., Gulino M., Hons Z., Kiss G.G., Kroha V., Kubono S.,*

- Cognata M. La., Li C., Mrazek J., Mukhamedzhanov A., Pizzone R. G., Puglia S. M. R., Wen Q., Rapisarda G. G., Rolfs C., Romano S., Sergi M. L., Somorjai E., Souza F. A., Szanto de Toledo A., Tabacaru G., Tumino A., Wakabayashi Y., Yamaguchi H., Zhou S.-H.* New Measurement of the $^{11}\text{B}(p, \alpha_0)^8\text{Be}$ Bare-Nucleus $S(E)$ Factor via the Trojan Horse Method // *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 2011. V. 39, No. 1. P. 015106.
4. *Munch M., Kirsebom O. S., Swartz J. A., Fynbo H. O. U.* Resolving the $^{11}\text{B}(p, \alpha_0)$ Cross-Section Discrepancies between 0.5 and 3.5 MeV // *Eur. Phys. J. A.* 2020. V. 56, No. 1. P. 17.
 5. *Mazzucconi D., Vavassori D., Dellasega D., Airaghi F. M., Agosteo S., Passoni M., Pola A., Bortot D.* Proton Boron Fusion Reaction: A Novel Experimental Strategy for Cross Section Investigation // *Rad. Phys. Chem.* 2023. V. 204. P. 110727.
 6. *Oliphant M. L. E., Rutherford E.* Experiments on the Transmutation of Elements by Protons // *Proc. Roy. Soc. London. Ser. A: Containing Papers of a Math. and Phys. Character.* 1933. V. 141, No. 843. P. 259–281.
 7. *Dee P. I., Gilbert P. W.* The Disintegration of Boron into Three α -Particles // *Proc. Roy. Soc. London. Ser. A: Math. and Phys. Sciences.* 1936. V. 154, No. 881. P. 279–296.
 8. *Symons G. D., Treacy P. B.* The $^{11}\text{B}(p, \alpha)^8\text{Be}$ Reaction and ^{12}C States between 15 and 20 MeV // *Nucl. Phys.* 1963. V. 46. P. 93–107.
 9. *Mashkarov Y. G., Dejneko A. S., Malakhov I. Y., Slabospitskij R. P., Storizhko V. E.* Study on the Elastic Scattering of Protons and (p, α_0) Reaction on the ^{11}B Nucleus // *Izv. AN SSSR. Ser. Fiz.* 1975. V. 39, No. 8. P. 1736–1738.
 10. *Taskaev S., Berendeev E., Bikchurina M., Bykov T., Kasatov D., Kolesnikov I., Koshkarev A., Makarov A., Ostreinov G., Porosev V., Savinov S., Shchudlo I., Sokolova E., Sorokin I., Sycheva T., Verkhovod G.* Neutron Source Based on Vacuum Insulated Tandem Accelerator and Lithium Target // *Biology.* 2021. V. 10, No. 5. P. 350.
 11. *Иванов А. А., Смирнов А. Н., Таскаев С. Ю., Баянов Б. Ф., Бельченко Ю. И., Давыденко В. И., Дунаевский А., Емелев И. С., Касатов Д. А., Макаров А. Н., Микенс М., Куксанов Н. К., Попов С. С., Санин А. Л., Сорокин И. Н., Сычёва Т. В., Щудло И. М., Воробьев Д. С., Черепков В. Г., Фадеев С. Н.* Ускорительный источник нейтронов для бор-нейтронозахватной терапии // *УФН.* 2022. Т. 192, № 8. С. 893–912.
 12. SIMNRA v. 7.03 with SigmaCalc 2.0 for Single User. License No. 1801-4848-WT-WA. 2021.

Получено 15 сентября 2023 г.