

Применение ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией VITA для измерения сечений ядерных реакций

**М.И. Бикчурина^{а,б,1}, Т.А. Быков^{а,б}, Д.Е. Грейскоп^{а,б}, Д.А. Касатов^{а,б},
Я.А. Колесников^{а,б}, А.М. Кошкарев^{а,б}, Г.М. Остреинов^{а,б}, С.С. Савинов^{а,б},
Е. О. Соколова^{а,б}, А.А. Шуклина^{а,б} и С.Ю. Таскаев^{а,б}**

^а Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия, ул. Ак. Лаврентьева 11, 630090

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

Ускорительный источник нейтронов VITA на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и литиевой мишени предложен и создан в Институте ядерной физики СО РАН в Новосибирске, Россия. Ускоритель заряженных частиц генерирует моноэнергетичные пучки протонов/дейтронов постоянного тока с энергией до 2,3 МэВ и током до 10 мА. Ускорительный источник нейтронов оснащен современными γ -, α - и нейтронными спектрометрами и дозиметрами. Установку активно используют для разработки методики бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей, для радиационного тестирования перспективных материалов и оборудования и в последнее время для измерения сечений ядерных реакций.

В статье будет дано описание установки, приведены ее характеристики, представлены результаты измерения сечений ядерных реакций взаимодействия протонов и дейтронов с литием и бором, важных для бор-нейтронозахватной терапии и для безнейтронной термоядерной энергетики. Также в статье будет приведено описание предложенной и применяемой методики измерения толщины материала, облучаемого пучком заряженных частиц для измерения сечения ядерной реакции, и приведено описание диагностической вакуумной камеры, позволяющей детально измерить углового распределения дифференциального сечения ядерной реакции, для достоверного определения величины полного сечения реакции. Отдельное внимание в статье уделяется представлению планов по дальнейшему применению установки для изучения ряда других ядерных реакций, включая реакцию генерации мощного потока позитронов и реакции с пучком α -частиц.

Application of the vacuum insulated tandem accelerator VITA for measuring nuclear reaction cross-sections

**M. Bikchurina^{а,б}, T. Bykov^{а,б}, D. Greyskop^{а,б}, D. Kasatov^{а,б}, Ya. Kolesnikov^{а,б},
A. Koshkarev^{а,б}, G. Ostreinov^{а,б}, S. Savinov^{а,б}, E. Sokolova^{а,б}, A. Shuklina^{а,б}
and S. Taskaev^{а,б}**

^а Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia, Lavrentiev str. 11, 630090

^б Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia, Pirogova str. 1, 630090

The accelerator neutron source based on a vacuum-insulated tandem accelerator VITA and a lithium target was proposed and created at the Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS in Novosibirsk, Russia. The charged particle accelerator generates monoenergetic beams of DC protons/deuterons with an energy of up to 2.3 MeV and a current of up to 10 mA. The accelerator neutron source is equipped with modern γ -, α - and neutron spectrometers and

¹ E-mail: M.I.Bikchurina@inp.nsk.su

dosimeters. The facility is actively used to develop methods for boron neutron capture therapy of malignant tumors, for radiation testing of promising materials and equipment, and more recently for measuring cross-sections of nuclear reactions.

The article will describe the installation, present its characteristics, and present the results of measuring the cross-sections of nuclear reactions of protons and deuterons interacting with lithium and boron, which are important for boron-neutron capture therapy and for un-neutron thermonuclear energy. The article also describes the proposed and applied technique for measuring the thickness of a material irradiated with a charged particle beam to measure the cross section of a nuclear reaction, and describes a diagnostic vacuum chamber that allows detailed measurement of the angular distribution of the differential cross section of a nuclear reaction to reliably determine the magnitude of the total cross section of the reaction. Special attention in the article will be paid to the presentation of plans for the further application of the facility to study a number of other nuclear reactions, including the generation of a powerful positron flux and reactions with a beam of alpha particles.

PACS: 29.20-c.

1. ВВЕДЕНИЕ

Измерение сечений ядерных реакций и достоверные значения сейчас представляют большой интерес для разных областей науки. В частности, особое внимание уделяется генерации нейтронов широкого спектра для различных приложений: от применения в медицине (бор-нейтронозахватной терапии) до материаловедения и фундаментальных исследований. Второй важный аспект в текущее время – развитие термоядерной энергетики, одним из перспективных направлений которой является развитие безнейтронного термоядерного синтеза.

В данной работе представлены результаты наших исследований взаимодействия протонного и дейтронного пучков с литиевой и борной мишенями.

2. СХЕМА УСТАНОВКИ

Исследование проводили на ускорительном источнике нейтронов VITA в Институте ядерной физики г. Новосибирск (Россия) [1]. Схема экспериментальной установки показана на рисунке 1. Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией 1 используют для получения моноэнергетичного пучка протонов или дейтронов с энергией от 0,1 МэВ до 2,3 МэВ (стабильность 0,1 %), током до 10 мА (стабильность 0,4 %). Ток пучка измеряют и контролируют неразрушающим трансформатором постоянного тока NPCT (Bergoz Instrumentation, Франция) 2. Пучок направляют на мишень 6 через 1 мм коллиматор 3.

Для измерения интенсивности и энергии обратно рассеянных заряженных частиц на патрубке мишенного узла 4, расположенные под углами 135° и 168° к оси пучка, через шибер установлены спектрометры α -излучения на основе кремниевого детектора ПДПА-1К и цифрового спектрометрического устройства ЦСУ-1К (Институт физико-технических проблем, Дубна, Россия). Для определения толщины и элементного состава исследуемого

образца используют программу SIMNRA v.7.03 (Max Planck Institute for Plasma Physics, Germany) [2].

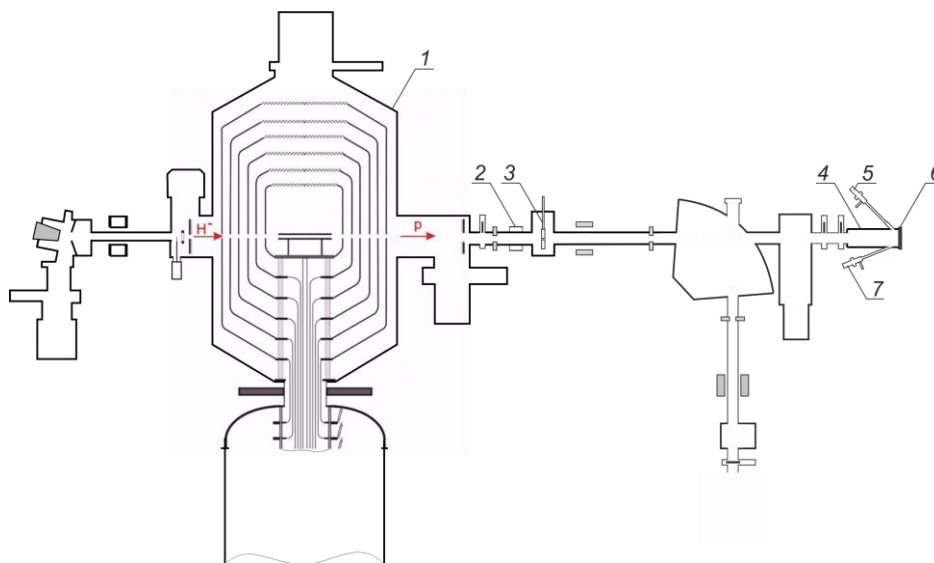


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки: 1 – ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией, 2 – неразрушающий трансформатор постоянного тока, 3 – коллиматор, 4 – мишенный узел, 5 – α -спектрометр под углом 135° , 6 – мишень, 7 – α -спектрометр под углом 168° .

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Взаимодействие лития с протонным пучком

Литиевая мишень представляет собой медный диск, на который термическим способом в вакууме напылен тонкий слой лития кристаллической плотности.

Есть три основных реакции взаимодействия лития с протоном с энергией ~ 2 МэВ: ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$, ${}^7\text{Li}(p,p'\gamma){}^7\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}(p,\alpha){}^4\text{He}$.

Первая реакция является нейтроногенерирующей и ее используют для проведения бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ) [1]. Выход нейтронов из литиевой мишени рассчитали путем измерения ее активации радиоактивным изотопом бериллий-7 с применением спектрометра γ -излучения на основе полупроводникового детектора, выполненного из особо чистого германия [3]. Впервые экспериментально продемонстрировано соответствие выхода нейтронов из конкретно изготовленной мишени расчетным значениям, что критически важно для планирования терапии и оценки результатов лечения.

Помимо нейтроногенерирующей реакции интерес в рамках БНЗТ представляет и реакция ${}^7\text{Li}(p,p'\gamma){}^7\text{Li}$. В результате данной реакции испускается фотон с энергией 478 кэВ. Полный выход фотонов и сечение реакции измерили с высокой точностью [4].

Установлено, что измеренная интенсивность излучения фотонов в 1,7 раза меньше расчетных значений. Позднее подобный эксперимент провела греческая группа ученых при энергии протонов от 1 до 4 МэВ, полученные результаты совпадают с нашими измерениями [5]. Выявленная зависимость выхода 478 кэВ фотонов от толщины литиевой мишени (рис. 2) позволила создать и осуществить *in situ* метод измерения толщины литиевого слоя [6]. Суть метода заключается в соотношении выхода фотонов из толстой и тонкой литиевой мишени. Толстой мишенью назовем ту, в литиевом слое которой энергия протонов падает ниже порога реакции (478 кэВ), а тонкой ту, в которой энергия протона на выходе будет выше 478 кэВ. Данный метод позволил значительно увеличить точность определения толщины литиевого слоя.

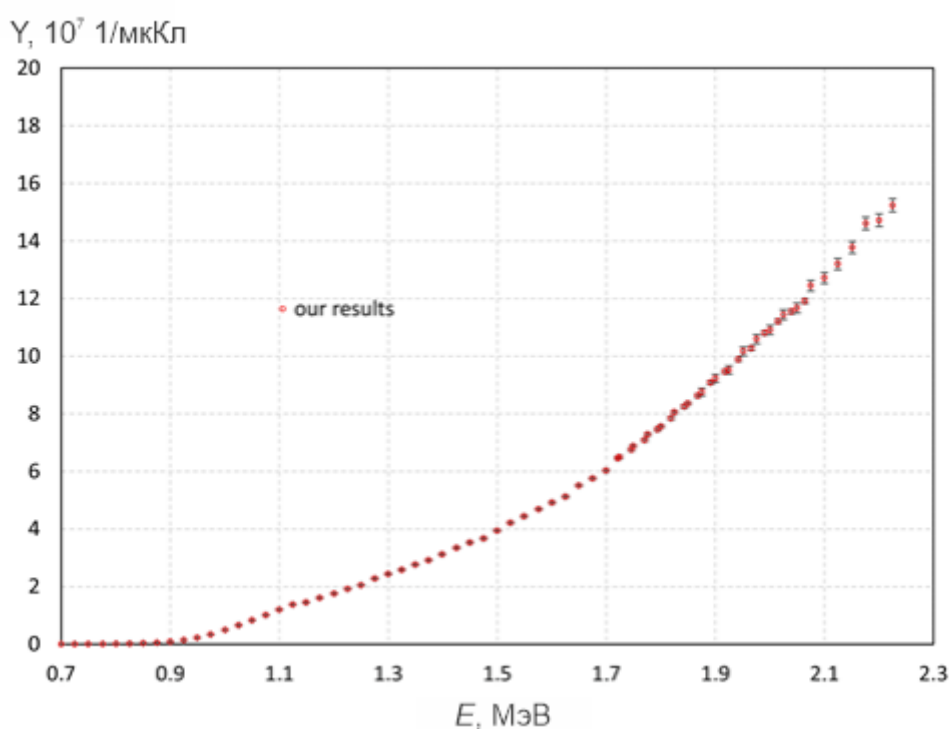


Рисунок 2 – Зависимость выхода 478-кэВ фотонов из реакции ${}^7\text{Li}(p,p'\gamma){}^7\text{Li}$ из толстой литиевой мишени с природным содержанием изотопов лития от энергии протонов E .

Третья реакция ${}^7\text{Li}(p,\alpha){}^4\text{He}$ является одной из перспективных термоядерных реакция, так как обладает высоким энерговыделением (17,34 МэВ). Несмотря на то, что есть значительное количество данных о сечении реакции, они характеризуются также существенным разбросом значений. Это послужило мотивацией для измерения полного сечения реакции ${}^7\text{Li}(p,\alpha){}^4\text{He}$. Поскольку реакция в низкой области энергий протонов является изотропной, значение полного сечения реакции (рис. 3) восстановили по измерениям выполненными под двумя углами (135° и 168° относительно оси пучка) [7].

Видно, что наши результаты совпадают со значениями сечения из базы данных JENDL-4.0, и в два раза больше значений из баз данных ENDF/B-VIII.0 и TENDL-2019.

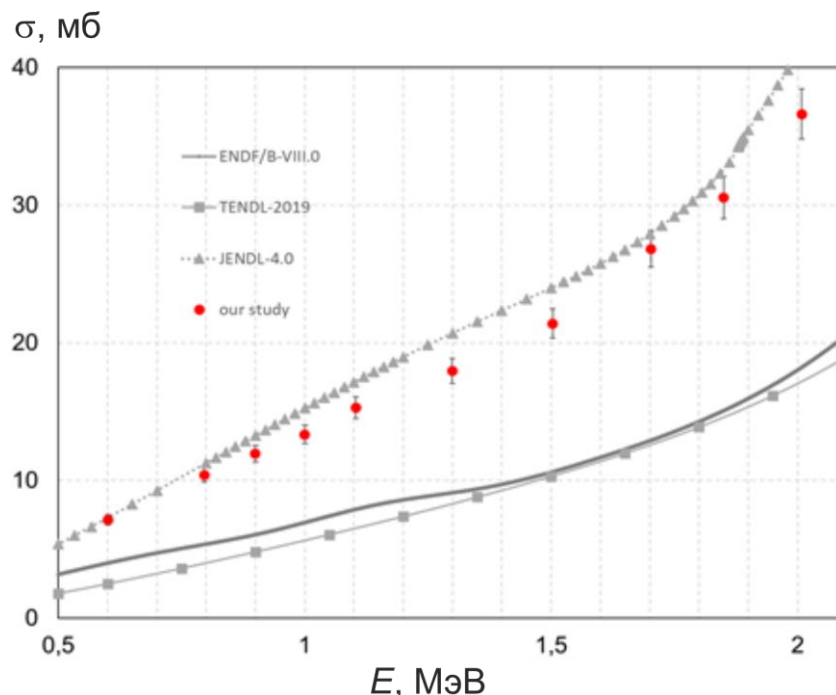


Рисунок 3 – Сечение реакции ${}^7\text{Li}(p,\alpha){}^4\text{He}$.

2. Взаимодействие лития с дейтронным пучком

При взаимодействии лития с дейтроном с энергией ниже 2,2 МэВ наблюдается большое разнообразие реакций. Данные в базах данных о многих из них неполные, а порой и совсем отсутствуют. Проанализировав спектр, полученный α -спектрометром при облучении тонкой литиевой мишени дейтронным пучком (рис. 4), измерили сечения следующих реакций: ${}^6\text{Li}(d,\alpha){}^4\text{He}$, ${}^6\text{Li}(d,p){}^7\text{Li}$, ${}^6\text{Li}(d,p){}^7\text{Li}^*$, ${}^7\text{Li}(d,\alpha){}^5\text{He}$, ${}^7\text{Li}(d,n\alpha){}^4\text{He}$. Результаты опубликованы в статье [8]. На рисунке 4 замечен сигнал от ядерных реакций при взаимодействии дейтрона с атомами кислорода и углерода. Это связано с тем, что на поверхности лития сразу после напыления формируется тонкая пленка (~ 10 мкм), содержащая атом кислорода и углерода, данная пленка практически не влияет на генерацию нейтронов, но при этом значительно замедляет процесс окисления основной массы лития. Помимо этого измерили сечение ядерной реакции ${}^7\text{Li}(d,n){}^8\text{Be}$, которая является источником быстрых нейтронов. Реакция протекает через основное состояние бериллия-8 и через первое возбужденное. Измерения выхода нейтронов проводились алмазным нейтронным детектором нашими коллегами из Проектного центра ИТЭР [9]. Значения сечения реакции, рассчитанные по выходу нейтронов, хорошо согласуются с расчетами по выходу α -частиц. В планах продолжить исследования взаимодействия лития с дейтроном с помощью мишени, обогащенной изотопом литий-6.

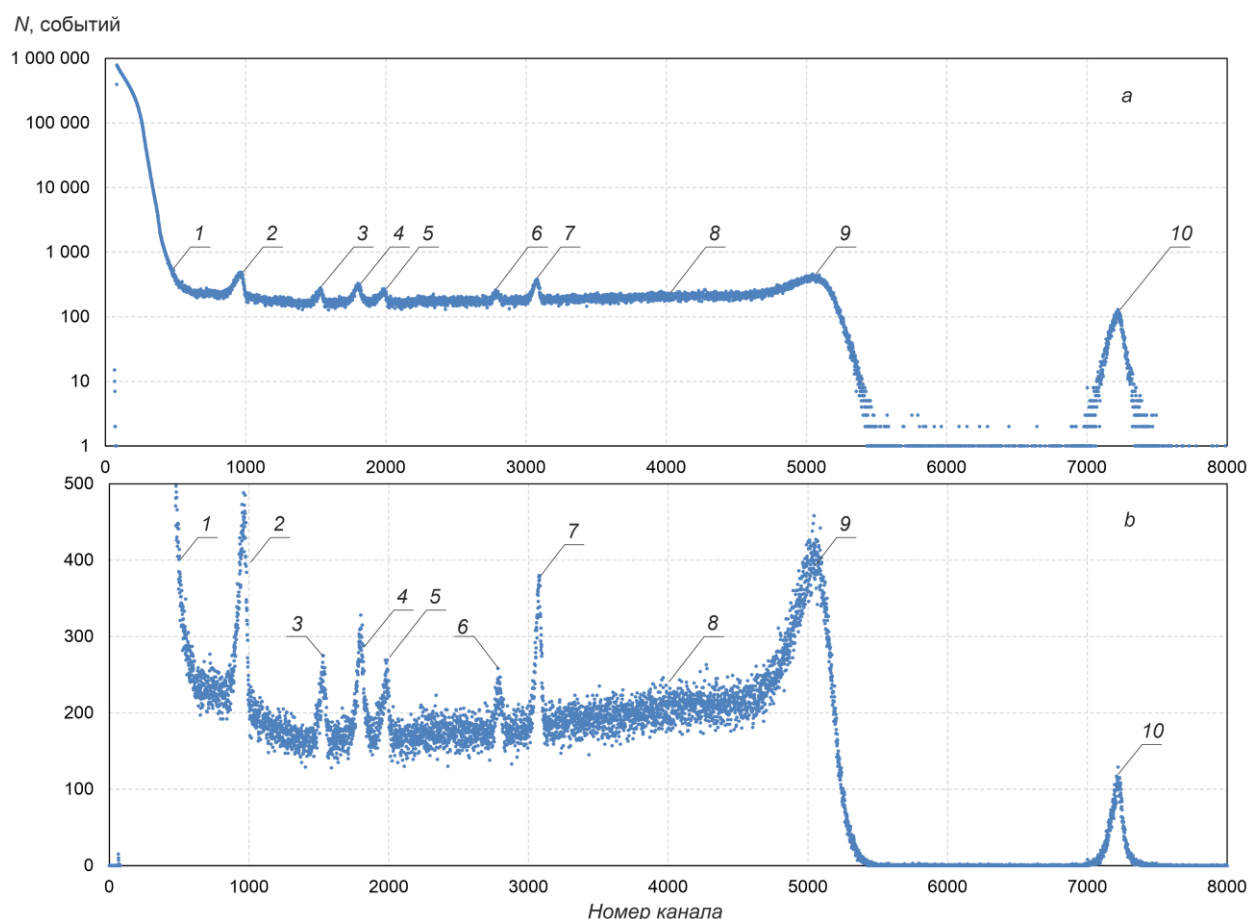


Рисунок 4 – Сигнал α -спектрометра при 0,6 МэВ пучке дейтронов: 1 – обратно рассеянные дейтроны; 2 – протоны реакции $^{16}\text{O}(\text{d},\text{p}_1)^{17}\text{O}^*$; 3 – протоны реакции $^{16}\text{O}(\text{d},\text{p}_0)^{17}\text{O}$; 4 – α -частицы реакции $^{16}\text{O}(\text{d},\alpha)^{14}\text{N}$; 5 – протоны реакции $^{12}\text{C}(\text{d},\text{p}_0)^{13}\text{C}$; 6 – протоны реакции $^6\text{Li}(\text{d},\text{p}_1)^7\text{Li}^*$; 7 – протоны реакции $^6\text{Li}(\text{d},\text{p}_0)^7\text{Li}$; 8 – α -частицы реакции $^7\text{Li}(\text{d},\text{n}\alpha)^4\text{He}$; 9 – α -частицы реакции $^7\text{Li}(\text{d},\alpha)^5\text{He}$; 10 – α -частицы реакции $^6\text{Li}(\text{d},\alpha)^4\text{He}$ (a – шкала ординат представлена в логарифмическом масштабе, b — в линейном).

3. Взаимодействие бора с протонным пучком

Реакция взаимодействия бора-11 с протоном давно привлекает общество как одна из перспективных реакция для безнейтронного термоядерного синтеза. Реакция $^{11}\text{B}(\text{p},\alpha)\alpha$ характеризуется высоким энергетическим выходом – 8,7 МэВ. Известно, что ядерная реакция взаимодействия бора-11 с протоном протекает тремя путями: $^{11}\text{B}(\text{p},\alpha_0)^8\text{Be}$, $^{11}\text{B}(\text{p},\alpha_1)^8\text{Be}^*$ и $^{11}\text{B}(\text{p},\alpha)\alpha$, однако в значениях сечений наблюдается большой разброс, представленный в базах данных.

Борная мишень представляет собой медный диск с тонким слоем бора (~ 1 мкм) на поверхности. Толщину слоя бора определили ранее изложенным для литиевой мишени методом, сравнив выход α -частиц из тонкой (исследуемой) мишени и из толстой (рис. 5). В качестве толстой мишени использовался карбид бора.

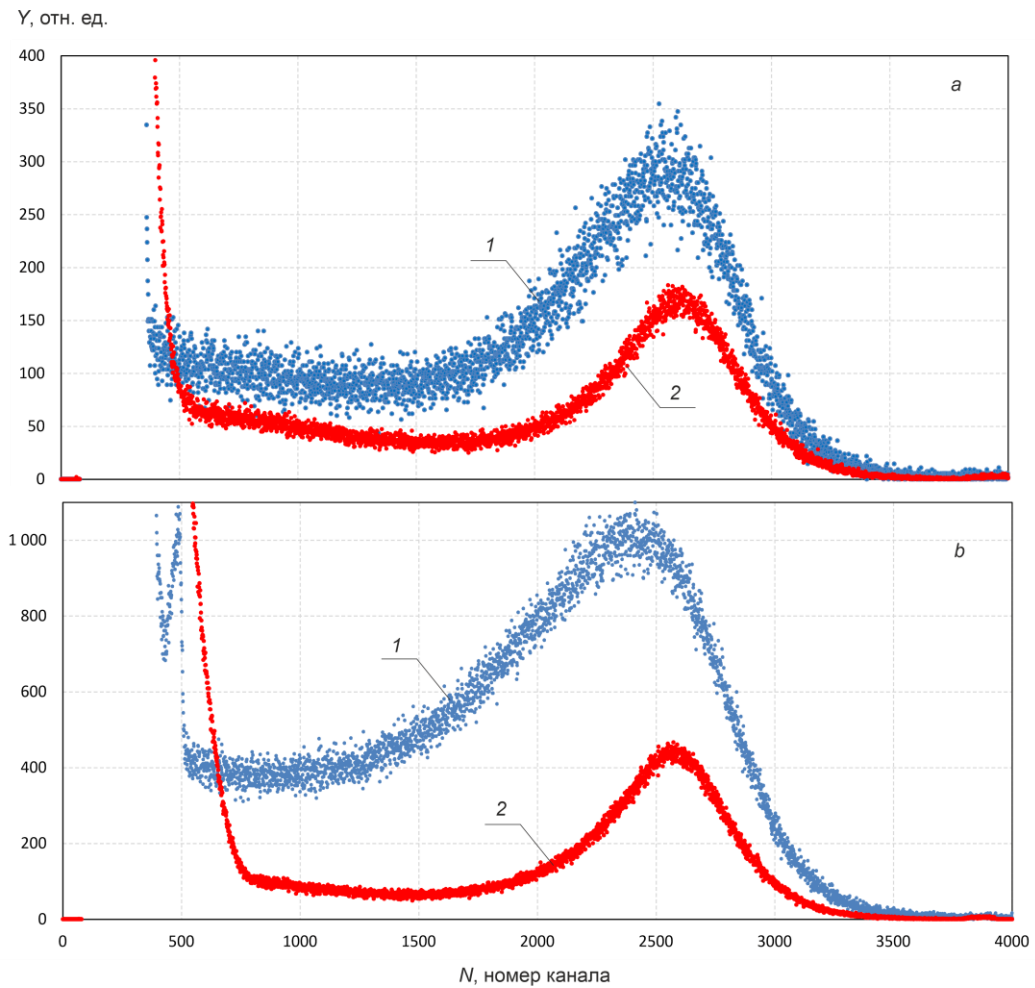


Рисунок 5 – Спектр, измеренный α -спектрометром, при энергии протонного пучка 0,5 МэВ (a) и 0,7 МэВ (b): 1 – толстая мишень, 2 – тонкая мишень.

Дифференциальные сечения реакций $^{11}\text{B}(p, \alpha_0)^8\text{Be}$ и $^{11}\text{B}(p, \alpha_1)^8\text{Be}^*$ измерили для углов 168° и 135° , результаты представлены в [10]. При сравнении со значениями сечений реакции $^{11}\text{B}(p, \alpha_0)^8\text{Be}$ из баз данных видно, что наши результаты хорошо согласуются с ними. В случае с данными сечения реакции $^{11}\text{B}(p, \alpha_1)^8\text{Be}^*$ есть только одно ранее опубликованное измерение, представленное в [11], сравнение с нашими данными показано на рис. 6. Так как реакция взаимодействия бора-11 с протоном протекает не только каскадным путем, нам было интересно провести оценку для прямого распада. В случае прямого распада энергия α -частиц находится в диапазоне от 0 до 9 МэВ. Таким образом, только события от прямого распада или шумовой сигнал могут находиться правее пика α -частиц из реакции $^{11}\text{B}(p, \alpha_0)^8\text{Be}$. Суммируя все события правее этого пика и предполагая куполообразную форму энергетического распределения α -частиц из прямого распада, мы получили вероятность прямого распада в 2000–3000 раз меньшую по сравнению с каскадным.

Дифференциальное сечение, мб/ср

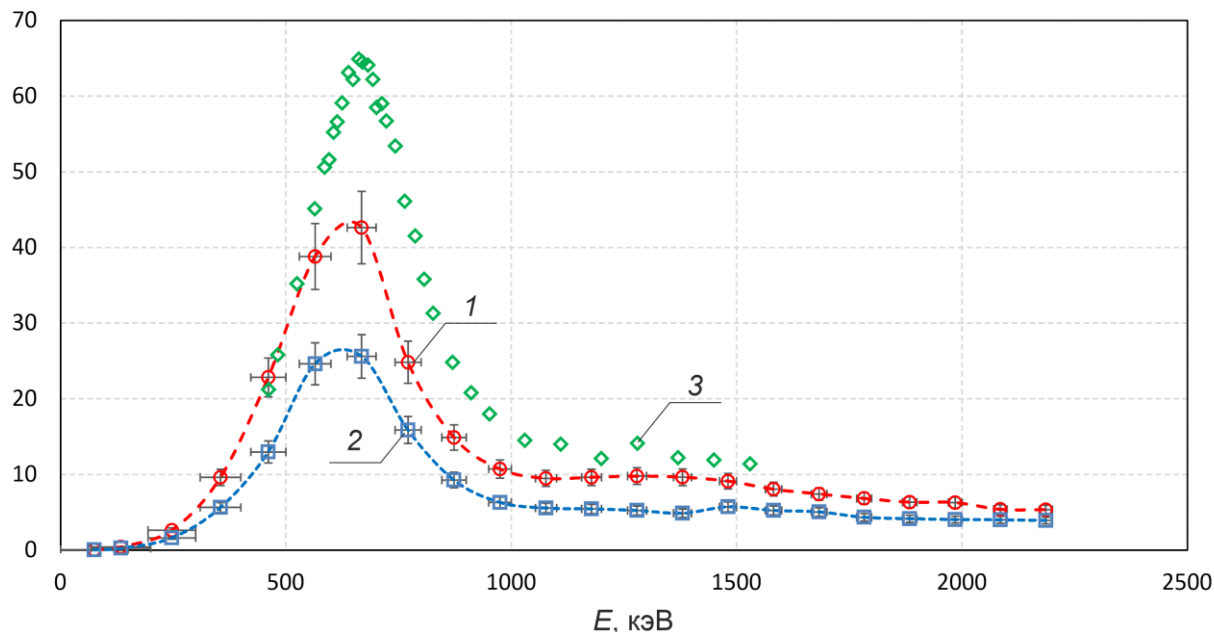


Рисунок 6 – Дифференциальное сечение $^{11}\text{B}(p, \alpha)^8\text{Be}^*$: 1 – 135° , 2 – 168° , 3 – [11].

4. Взаимодействие бора с дейтронным пучком

Взаимодействие бора и дейтрона характеризуется большим количеством реакций, анализ спектра осложняет значительный вклад от реакций азота с дейтроном и многочисленными двойными событиями (одновременной регистрацией двух дейтронов), что дает подложку в низкоэнергетичной части спектра.

Мы измерили ряд сечений ядерных реакций взаимодействия дейтрона с бором [12]: $^{10}\text{B}(d, \alpha_0)^8\text{Be}$, $^{10}\text{B}(d, \alpha_1)^8\text{Be}^*$, $^{11}\text{B}(d, \alpha_0)^9\text{Be}$, $^{10}\text{B}(d, p_2)^{11}\text{B}$, $^{11}\text{B}(d, \alpha_2)^9\text{Be}^*$.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На ускорительном источнике нейтронов VITA в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН в г. Новосибирске, Россия, измерены сечения ядерных реакций взаимодействия протона и дейтрона с литием: $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$, $^7\text{Li}(p, p'\gamma)^7\text{Li}$, $^7\text{Li}(p, \alpha)^4\text{He}$ и $^6\text{Li}(d, \alpha)^4\text{He}$, $^6\text{Li}(d, p)^7\text{Li}$, $^6\text{Li}(d, p)^7\text{Li}^*$, $^7\text{Li}(d, \alpha)^5\text{He}$, $^7\text{Li}(d, n\alpha)^4\text{He}$, $^7\text{Li}(d, n)^8\text{Be}$; а также протона и дейтрона с бором: $^{11}\text{B}(p, \alpha_0)^8\text{Be}$, $^{11}\text{B}(p, \alpha_1)^8\text{Be}^*$ и $^{10}\text{B}(d, \alpha_0)^8\text{Be}$, $^{10}\text{B}(d, \alpha_1)^8\text{Be}^*$, $^{11}\text{B}(d, \alpha_0)^9\text{Be}$, $^{10}\text{B}(d, p_2)^{11}\text{B}$, $^{11}\text{B}(d, \alpha_2)^9\text{Be}^*$.

В дальнейших планах продолжить и углубить исследования по данной теме. Создана специальная вакуумная камера (рис. 7) с десятью патрубками для установки α -спектрометров. Также, закуплен второй спектрометрический комплекс и ряд детекторов,

наличие которых позволит проводить измерения одновременно под двумя углами. Полученные данные позволят рассчитать полное сечение ядерных реакций. В будущих планах стоит и модернизация ускорительного источника нейтронов VITA, в частности ионного источника, благодаря чему к спектру генерируемых пучков добавится и пучок α -частиц.

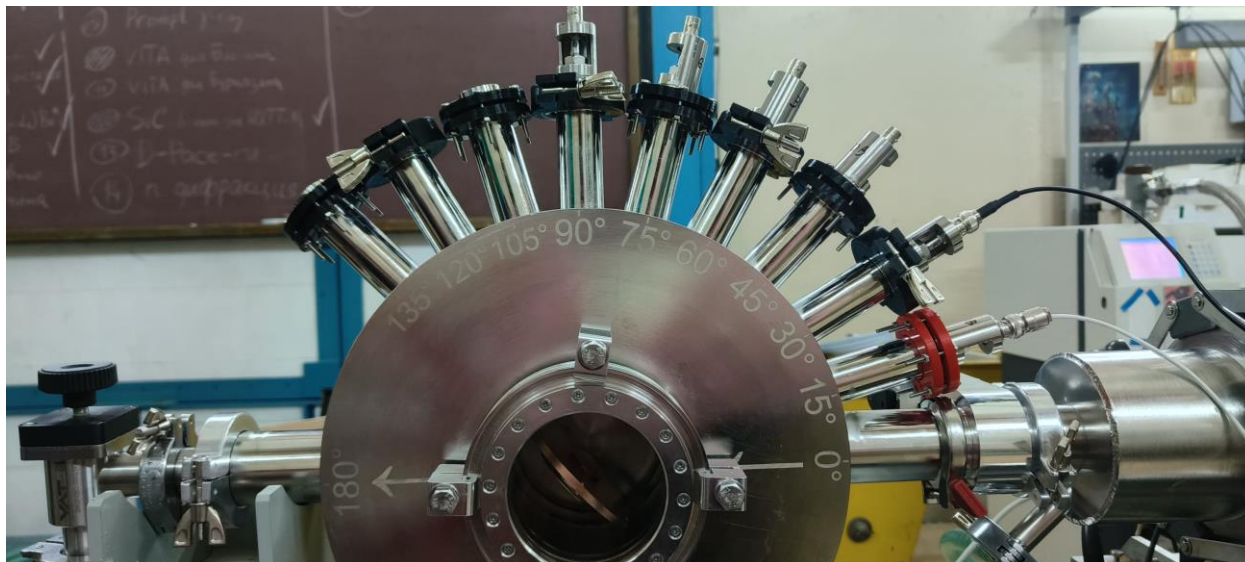


Рисунок 6 – Спектрометрический комплекс на установке VITA.
ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-72-30005), <https://rscf.ru/project/19-72-30005>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Neutron Source Based on Vacuum Insulated Tandem Accelerator and Lithium Target / S. Taskaev, E. Berendeev, M. Bikchurina, T. Bykov, D. Kasatov, I. Kolesnikov, A. Koshkarev, A. Makarov, G. Ostreinov, V. Porosev, S. Savinov, I. Shchudlo, E. Sokolova, I. Sorokin, T. Sycheva, G. Verkhovod. // *Biology*. – 2021. – vol. 10. – p. 350.
2. SIMNRA v. 7.03 with SigmaCalc 2.0 for single user. License No. 1801-4848-WT-WA.
3. The measurement of the neutron yield of the ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ reaction in lithium targets / M. Bikchurina, T. Bykov, D. Kasatov, I. Kolesnikov, A. Makarov, I. Shchudlo, E. Sokolova, S. Taskaev. // *Biology*. – 2021. – Vol. 10, nr 9. – P. 824.
4. Measurement of the ${}^7\text{Li}(p,p'\gamma){}^7\text{Li}$ Reaction Cross-Section and 478 keV Photon Yield from a Thick Lithium Target at Proton Energies from 0.65 MeV to 2.225 MeV / S. Taskaev, T. Bykov, D. Kasatov, Ia. Kolesnikov, A. Koshkarev, A. Makarov, S. Savinov, I. Shchudlo, E. Sokolova. // *Nucl. Instr. Meth. B*. – 2021. – vol. 502. – pp. 85–94.
5. Differential Cross Section Measurements of the ${}^7\text{Li}(p,p\gamma_{1-0}){}^7\text{Li}$ Reaction Suitable for PIGE Applications / Ziagkova A., Axiotis M., Harissopoulos S., Kokkoris M., Lagoyannis A., Maragos F., Ntemou E., Taimpiri E. // *Nucl. Instr. Meth. B*. – 2023. – vol. 539. – pp. 113–119.
6. Method for in situ measuring the thickness of a lithium layer / D. Kasatov, Ia. Kolesnikov, A. Koshkarev, A. Makarov, E. Sokolova, I. Shchudlo, S. Taskaev. // *Journal of Instrumentation*. – 2020. – vol. 15. – P10006.
7. Cross-section measurement for the ${}^7\text{Li}(p,\alpha){}^4\text{He}$ reaction at proton energies 0.6 – 2 MeV / S. Taskaev, M. Bikchurina, T. Bykov, D. Kasatov, Ia. Kolesnikov, A. Makarov, G. Ostreinov, S.

- Savinov, E. Sokolova. // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B. – 2022. – vol. 525. – pp. 55-61.
8. Measurement of cross-section of the ${}^6\text{Li}(d,\alpha){}^4\text{He}$, ${}^6\text{Li}(d,p){}^7\text{Li}$, ${}^6\text{Li}(d,p){}^7\text{Li}^*$, ${}^7\text{Li}(d,\alpha){}^5\text{He}$ and ${}^7\text{Li}(d,n\alpha){}^4\text{He}$ reactions at the deuteron energies from 0.3 MeV to 2.2 MeV / S. Taskaev, M. Bikchurina, T. Bykov, D. Kasatov, Ia. Kolesnikov, G. Ostreinov, S. Savinov, E. Sokolova. // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B. – 2024. – vol. 554. – p. 165460.
 9. Measurement of Cross-Section of the ${}^7\text{Li}(d,n){}^8\text{Be}$ Reactions at the Deuteron Energies from 0.4 to 2.1 MeV / S. Meshchaninov, A. Krasilnikov, N. Rodionov, Yu. Kashchuk, S. Obudovsky, A. Dzhurik, T. Kormilitsyn, R. Rodionov, V. Amosov, G. Nemtsev, M. Bikchurina, T. Bykov, G. Verkhovod, D. Kasatov, Ya. Kolesnikov, G. Ostreinov, E. Sokolova, and S. Taskaev. // Physics of Atomic Nuclei. – 2024. – vol. 87, suppl. 6. – S771–S785.
 10. Measurement of the ${}^{11}\text{B}(p,\alpha_0){}^8\text{Be}$ and the ${}^{11}\text{B}(p,\alpha_1){}^8\text{Be}^*$ reactions cross-sections at the proton energies up to 2.2 MeV / S. Taskaev, V. Bessmeltsev, M. Bikchurina, T. Bykov, D. Kasatov, Ia. Kolesnikov, A. Nikolaev, E. Oks, G. Ostreinov, S. Savinov, A. Shuklina, E. Sokolova, G. Yushkov. // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B. – 2024. – vol. 555. – p. 165490.
 11. Cross-sections of ${}^{11}\text{B}(p,\alpha){}^8\text{Be}$ reaction for boron analysis / J. Liu, X. Lu, X. Wang, W. Chu. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B. – 2002. – vol. 190. – pp. 107–111.
 12. Measurement of the ${}^{10}\text{B}(d,\alpha_0){}^8\text{Be}$, ${}^{10}\text{B}(d,\alpha_1){}^8\text{Be}^*$, ${}^{10}\text{B}(d,p_2){}^9\text{Be}^*$, ${}^{11}\text{B}(d,\alpha_0){}^9\text{Be}$, and ${}^{11}\text{B}(d,\alpha_2){}^9\text{Be}^*$ reactions cross-sections at the deuteron energies up to 2.2 MeV / S. Taskaev, V. Bessmeltsev, M. Bikchurina, T. Bykov, D. Kasatov, I. Kolesnikov, A. Nikolaev, E. Oks, G. Ostreinov, S. Savinov, A. Shuklina, E. Sokolova, G. Yushkov. // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B. – 2024. – vol. 557. – p. 165527.