

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 539.171.018

ИЗУЧЕНИЕ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ ${}^2\text{H}(d, n){}^3\text{He}$ И ${}^2\text{H}(d, p){}^3\text{H}$ ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ПУЧКОВ ДЕЙТРОНОВ. ЭКСПЕРИМЕНТ POLFUSION

© 2021 г. А. Андреянов^а*, А. Васильев^а, М. Взнуздаев^а, К. Ившин^а, Л. Коченда^а,
П. Кравченко^а, П. Кравцов^а, В. Ларионов^а, С. Микиртычьянц^а, А. Рождественский^а,
А. Соловьев^а, И. Соловьев^а, В. Трофимов^а, В. Фотьев^а, коллаборация PolFusion

^аНИИЦ “Курчатовский институт” – ПИЯФ, Гатчина, Ленинградская обл., 188300 Россия

*E-mail: andreyanov_av@pnpi.nrcki.ru

Поступила в редакцию 28.12.2020 г.

После доработки 30.12.2020 г.

Принята к публикации 14.01.2021 г.

В НИИЦ “Курчатовский институт” – ПИЯФ, в коллаборации с исследовательским центром Юлиха, Германия и университетом города Феррары, Италия, ведется подготовка эксперимента PolFusion, в котором будут изучаться реакции ${}^2\text{H}(d, n){}^3\text{He}$ и ${}^2\text{H}(d, p){}^3\text{H}$ с поляризованными пучком и мишенью при низких энергиях до 100 кэВ. В этом эксперименте будут измерены дифференциальные сечения и спин-корреляционные коэффициенты для различных соотношений поляризации пучка и мишени. В статье рассматривается статус эксперимента PolFusion, а также проводится обзор теоретических моделей, которые используются для описания dd-синтеза. Рассматривается математический аппарат разложения по парциальным волнам, который будет применен для обработки полученных экспериментальных данных.

Ключевые слова: термоядерный синтез, дейтрон, поляризация, dd-синтез, разложение по парциальным волнам

DOI: 10.56304/S2079562920060056

1. ВВЕДЕНИЕ

Рост энергопотребления в мире повышает интерес к изучению альтернативных источников энергии. Одним из важнейших таких источников является ядерная энергия, а в частности реакции термоядерного синтеза. Сечения ядерных реакций с участием легких ядер хорошо изучены, однако не все их характеристики на данный момент известны. Особенно это касается спинового сектора, поскольку влияние спиновых эффектов на реакции легких ядер достаточно велики.

Перспективным направлением в исследованиях является идея поляризованного термоядерного синтеза, т.е. использование топлива в определенном спиновом состоянии. Такое топливо, по теоретическим оценкам, может иметь несколько преимуществ.

Во-первых, некоторые теоретические работы [1] предсказывают существенное увеличение сечения реакции синтеза, что позволит получать больший выход энергии при той же плотности плазмы. Например, для реакции ${}^3\text{H}(d, n){}^4\text{He}$ использование дейтрона и трития с сонаправлен-

ными спинами приводит к увеличению сечения реакции примерно на 50%.

Во-вторых, определение спин-корреляционных коэффициентов позволит сделать вывод о возможности создания термоядерного реактора с малым выходом нейтронов. Теоретические расчеты [1] предсказывают уменьшение выхода нейтронов в реакциях поляризованного синтеза. При сонаправленных спинах двух дейтронов реакция с участием нейтрона оказывается Паули-запрещенной в первом порядке, т.к. в ней происходит переворот спина. Знание полного набора элементов матрицы рассеяния может привести к управлению нейтронным каналом в термоядерном реакторе. Это позволит оптимизировать передачу энергии от плазмы защитным системам реактора и, следовательно, продлить время работы этих систем, что, в свою очередь, приведет к снижению стоимости термоядерной энергии.

Вопрос о влиянии спиновых состояний исходных ядер термоядерного синтеза на вероятность реакции и на асимметрию вылета продуктов реакции возник сравнительно давно. В Курчатовском институте в 1976 году был предложен экспе-

римент по исследованию коэффициентов корреляции поляризации в реакциях ${}^2\text{H}(d, p){}^3\text{H}$ и ${}^2\text{H}(d, n){}^3\text{He}$ при столкновении поляризованных дейтронов в вакууме [2]. В то время данный проект не мог быть реализован, так как техника поляризованных атомарных и ионных источников дейтерия не позволяла получить пучки достаточной интенсивности.

Позднее возникали различные проекты использования поляризованного топлива для термоядерных реакторов, основанные на теоретических представлениях о дифференциальных сечениях реакций поляризованных дейтронов [3]. Однако, при работе с теоретическими моделями выяснилось, что решение четырех-нуклонной задачи с учетом спина очень затруднительно. Различные модели дают противоречивые результаты. Обзор теоретических представлений и существующих экспериментальных данных был сделан в работе [1].

НИЦ “Курчатовский институт” – ПИЯФ в коллаборации с исследовательским центром Юлиха, Германия и университетом города Феррары, Италия ведет работы по созданию установки (проект PolFusion [4]) для исследования реакций ядерного синтеза дейтронов ${}^2\text{H}(d, p){}^3\text{H}$ и ${}^2\text{H}(d, n){}^3\text{He}$ с поляризованным пучком и мишенью при низких энергиях до 100 кэВ.

Задачами эксперимента являются измерение асимметрии дифференциального сечения для различных каналов указанных реакций, а также измерение полного сечения реакции dd -синтеза при поляризации исходных частиц по сравнению с неполяризованным сечением (например фактор подавления квинтетного состояния). Планируется экспериментальное определение спин-корреляционных коэффициентов $C_{z,z}$ и $C_{zz,zz}$ в частности, для определения фактора подавления квинтетного состояния для обоих каналов реакции dd -синтеза. Данная величина имеет противоречивые теоретические предсказания [1] и играет важную роль для создания термоядерного реактора с малым выходом нейтронов.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА POLFUSION

В рамках эксперимента PolFusion планируется измерение спин-корреляционных коэффициентов реакции взаимодействия двух дейтронов при низких энергиях до 100 кэВ. Эта реакция имеет два канала: ${}^2\text{H}(d, p){}^3\text{H}$ и ${}^2\text{H}(d, n){}^3\text{He}$.

Из-за низкой энергии сталкивающихся частиц их проникающая способность крайне мала. Поэтому в качестве мишени будет использоваться газовый поток, создаваемый источником атомарного пучка (Atomic Beam Source (ABS)) (см. рис. 1). Еще

одним фактором в пользу выбора газовой мишени является то, что твердотельная мишень не позволяет создать детектор в 4π -разрешении, который необходим для наблюдения асимметрии вылета продуктов реакции. Также необходимо заметить, что дейтериевый пучок от ABS пренебрежимо мало влияет на вылетающие частицы из-за его малой плотности. Недостатком такого подхода является низкая скорость счета событий.

Источник ABS создан на базе установки предоставленной университетом города Феррары, Италия, который ранее использовался в IUCF [5]. Он выдает атомарный пучок с необходимой векторной или тензорной поляризацией с энергией около 0.01 эВ. Интенсивность пучка, достигаемая в IUCF, составляет $4 \cdot 10^{16}$ атомов в секунду. Группой ПИЯФ были внесены изменения, направленные на увеличение интенсивности и надежности атомарного источника [6]. Была сделана система охлаждения сопла и установлен новый радиочастотный генератор диссоциатора.

Мишень бомбардируется ионами дейтерия с энергией 10–100 кэВ, которые испускаются источником поляризованных ионов (POLarized Ion Source (POLIS)) (рис. 1). Этот источник ранее использовался в качестве инжектора пучка с энергией 35 кэВ на ускорителе в институте KVI, Гронинген, Нидерланды [7]. Для эксперимента PolFusion энергия пучка должна достигать до 100 кэВ. Для этого были проведены модификации диссоциатора и сопла в системе образования пучка; электромагнитные гексапольные магниты были заменены постоянными магнитами; разработан новый ионизатор, основанный на циклотронном резонансе.

Для постоянного контроля за поляризацией атомарного и ионного пучков используются два поляриметра: один на лэмбовском сдвиге (Lamb-Shift Polarimeter (LSP)) [8], второй на асимметрии ядерных реакций (Nuclear Reaction Polarimeter (NRP)) [9]. LSP будет использоваться для начальной юстировки и измерения поляризации обоих пучков, а также для постоянного измерения поляризации атомарного пучка. NRP будет использоваться для измерения поляризации ионного пучка при высоких энергиях, поскольку эффективность LSP резко падает при увеличении энергии частиц выше 1 кэВ. NRP основан на реакции ${}^2\text{H}(d, p){}^3\text{H}$ с использованием неполяризованной мишени.

Детекторная система представляет собой кубическую структуру, состоящую из 576 PIN-диодов, т.е. частицы регистрируются в телесном угле 4π . Задача детекторной системы – определение углового распределения продуктов реакции, т.е. протонов, ${}^3\text{H}^+$ и ${}^3\text{He}^{2+}$. Нейтроны в эксперименте не регистрируются. Центр каждой плоскости детектора имеет отверстие для прохождения ато-

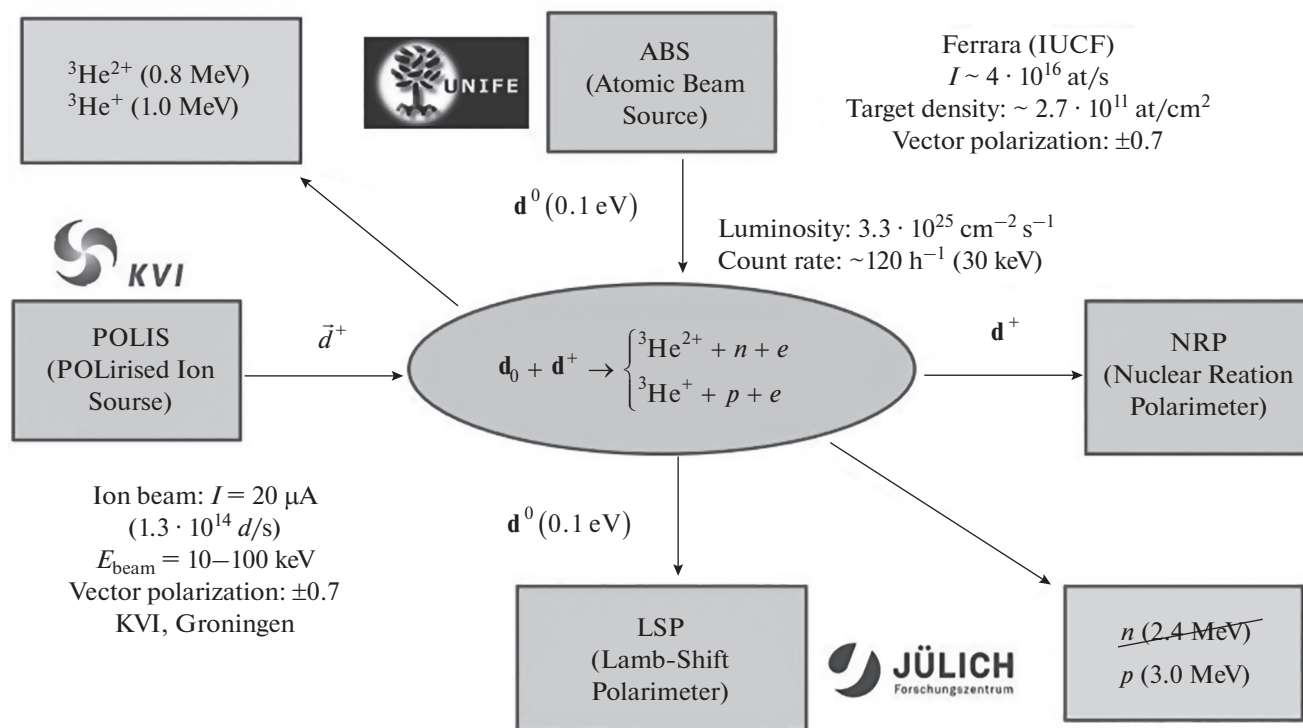


Рис. 1. Схема эксперимента PolFusion.

марного и ионного пучков (отверстия в верхней и нижней плоскостях — для улучшения вакуумной откачки). Эффективность покрытия детекторной системы — 51%. Энергетическое разрешение детектора лежит в пределах от 200 кэВ до 4 МэВ.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Основным методом вычисления ядерных характеристик трех- и четырехнуклонных систем является решение соответствующих уравнений Фадеева–Якубовского [10]. Для неполяризованных ядер этот метод, основанный на реалистичных потенциалах с учетом кулоновского взаимодействия, дает хорошее согласие с экспериментом [11]. Однако, в случае поляризованных частиц, например при измерении анализирующей способности A_y , существует 20–30% расхождение между теорией и экспериментом [12]. Причиной такого расхождения обычно считаются плохо изученные трехнуклонные силы.

Теоретический анализ усложняется наличием кулоновских эффектов, которые особенно сильны при низких энергиях. Решение уравнений Фадеева–Якубовского для такого случая четырехнуклонной системы пока отсутствуют. В отличие от ${}^2\text{H}(t, n){}^4\text{He}$ реакции, где основную роль играет S-волна, dd -синтез осложняется тем, что вкладом P- и D-волн во входной канал нельзя пренебречь,

даже при очень низких энергиях. Отсюда следует, что поляризационные эффекты в dd -синтезе должны быть значительно выше, чем для случая dt -синтеза. Поэтому для расчета ядерных характеристик реакций с поляризованными начальными частицами используются приближенные методы вычисления. Рассмотрим некоторые, часто используемые модели.

Модели содержащие регулируемые параметры, такие как метод R-матрицы [13]. Параметры в этих моделях подбираются с учетом существующих экспериментальных данных, и дифференциальные сечения находятся путем экстраполяции на область низких энергий. Основная идея метода R-матрицы заключается в разделении пространства на две области: на внутреннюю область (с радиусом a), где важны ядерные силы, и внешнюю область, где взаимодействие между ядрами определяется только кулоновским взаимодействием.

Метод резонирующих групп (Resonating Group Method (RGM)) [14]. Данный метод использует кластерную аппроксимацию, при которой нуклоны реакции группируются в кластеры. Для этого используются эффективные взаимодействия из теории поля. В методе RGM кулоновские поправки могут быть учтены более простым способом, нежели в методике Фадеева–Якубовского, что является серьезным преимуществом. Результаты расчетов RGM для случая трехнуклонной системы хорошо согласуются с аналогичными расчета-

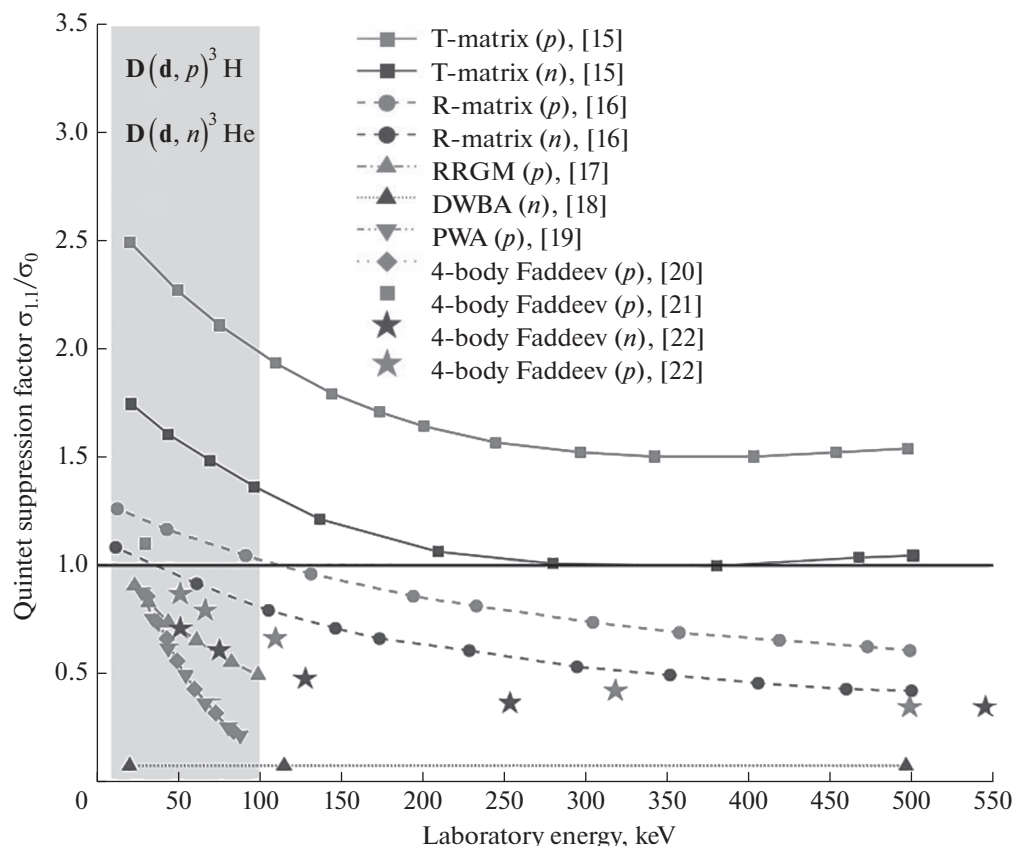


Рис. 2. Расчеты фактора подавления квинтетного канала в различных теоретических моделях.

ми уравнений Фадеева–Якубовского [23]. Однако, этот метод требует высоких вычислительных мощностей.

Метод искаженных волн — Distorted Wave Born Approximation (DWBA) [18]. Приближение искаженных волн — это теория возмущений по взаимодействию между каналами, в которой в качестве волновых функций начального и конечного состояний берутся не плоские волны, а так называемые “искаженные” волны определенного вида. Является частным случаем класса потенциальных моделей.

Ab-initio модели [24]. Высокие вычислительные мощности привели к развитию так называемых ab-initio моделей включающих в рассмотрение NN-, 3N-потенциалы, а также учитывающие различные свойства системы. Один из наиболее известных таких подходов — модель оболочек без инертного кора (no-core shell method (NCSM)) [25].

Trojan horse method (THM) [26]. ТНМ относится к непрямым методам измерения, который позволяет определить дифференциальные сечения и астрофизический фактор реакций передачи для области низких энергий (<300 кэВ). “Троянским

конем” является тяжелая частица, которая преодолевает кулоновский барьер, после чего происходит реакция передачи дейтрона. Характеристики взаимодействия осколка с мишенью вычисляются по данным экспериментов для реакций на высоких энергиях (>1 МэВ). Основное преимущество метода троянского коня заключается в том, что вычисленное сечение двухчастичного процесса не содержит кулоновских поправок.

Сравнение различных теоретических расчетов для реакций *dd*-синтеза может быть проведено на основе величины фактора подавления квинтетного канала (Quintet Suppression Factor (QSF)) [1]. Эта величина определяется как отношение поперечного сечения для параллельно направленных спинов дейтронов $\sigma_{1,1}$ к неполяризованному сечению σ_0 . Если $\text{QSF} = 1$, то это означает, что поляризация исходных частиц не влияет на сечение реакции. Как видно из рис. 2 различные теоретические модели дают противоречивые предсказания в области низких энергий, поэтому требуется прямое измерение реакции *dd*-синтеза в этой области.

В рамках эксперимента PolFusion проводится расчет ядерных характеристик реакций с исполь-

зованием математического аппарата разложения по парциальным волнам [27]. Этот аппарат позволяет определить амплитуду реакции из эксперимента. Для этого используется тот факт, что матричные элементы амплитуды можно разложить в бесконечный ряд по некоторому базису, например по собственным функциям оператора углового момента. Этот аппарат учитывает известные свойства сил взаимодействия (законы сохранения и др.), а для учета неизвестных свойств вводятся параметры, называемые парциальными амплитудами, которые находятся с использованием экспериментальных данных (дифференциальные сечения и поляризационные параметры продуктов реакции, асимметрии, коэффициенты корреляции). Разложение матричных элементов амплитуды в представлении полного спина системы двух частиц выражается следующим образом [28]:

$$B_{\sigma' \sigma}^{s's} = \frac{1}{2i\sqrt{k_i k_f}} \sum_{Jl'l'} i^{l-l'} \sqrt{4\pi(2l+1)} C_{l0s\sigma}^{J\sigma} \times \\ \times C_{l',\sigma-\sigma',s'\sigma}^{J\sigma} R_{l'l}^{Js's} Y_{l',\sigma-\sigma'}(\theta, \phi), \quad (1)$$

где $R_{l'l}^{Js's}$ — комплексная парциальная амплитуда; $Y_{lm}(\theta, \phi)$ — сферические функции; J — полный момент для данной парциальной волны; l, l' — орбитальные моменты начального и конечного состояния; $C_{j_1 m_1 j_2 m_2}^{JM}$ — коэффициенты Клебша–Гордана; k_i, k_f — импульсы частицы в начальном и конечном состояниях.

Данные, полученные при поляризованных пучке и мишени позволят восстановить полный набор парциальных амплитуд. Знание полного их набора позволит вычислить дифференциальные сечения для любых энергий.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперимент PolFusion по измерению спин-корреляционных коэффициентов в реакциях $^2\text{H}(d, p)^3\text{H}$ и $^2\text{H}(d, n)^3\text{He}$ будет первым экспериментом с поляризованными пучком и мишенью, который позволит оценить возможные преимущества использования поляризованного топлива в термоядерных реакторах, а также будет полезен в систематических исследованиях ядерных реакций с участием поляризованных легких ядер.

Проведены тестовые сеансы с неполяризованным пучком энергией 10 кэВ: в 2015 г. — для твердотельной мишени, в 2019 г. — для газовой мишени из паров тяжелой воды. Протестированы работоспособность ионного источника и считывающей электроники детектора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Paetz gen. Schieck H.* // Eur. Phys. J. A. 2010. V. 44. P. 321–354.
2. *Ad'yasevich B., Antonenko V.* // Preprint IEA-2704. 1976. Moscow.
3. *Honig A., Sandorfi A.* // AIP Conf. Proc. 2007. V. 915. P. 1010–1018.
4. *Grigoryev K. et al.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2011. V. 295. No. 1. P. 012168.
5. *Wise T. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 1993. V. 336. No. 3. P. 410–422.
6. *Solovev A. et al.* // J. Instrum. 2020. V. 15. No. 08. P. C08003.
7. *Kremers H.R., Drentje A.G.* // AIP Conf. Ser. 1998. V. 421. P. 507–508.
8. *Engels R. et al.* // Rev. Sci. Instrum. 2003. V. 74. No. 11. P. 4607–4615.
9. *Kroll L.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2011. V. 295. P. 012138.
10. *Yakubovsky O.A.* // Sov. J. Nucl. Phys. 1967. V. 5. P. 937.
11. *Deltuva A., Fonseca A.C., Sauer P.U.* // Phys. Rev. C. 2005. V. 72. P. 054004.
12. *Viviani M. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 86. P. 3739.
13. *Descouvemont P., Baye D.* // Rep. Prog. Phys. 2010. V. 73. No. 3. P. 036301.
14. *Ferreira L.S. et al.* // Lect. Notes Phys. 1987. V. 273. P. 243.
15. *Lemaitre S., Paetz gen. Schieck H.* // Ann. Phys. (Leipzig). 1993. V. 2. P. 503.
16. *Hale G., Doolen G.* LA-9971-MS Report. 1984. Los Alamos: LANL.
17. *Hofmann H.M., Fick D.* // Phys. Rev. Lett. 1984. V. 52. P. 2038.
18. *Zhang J. S. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1986. V. 57. P. 1410.
19. *Zhang J.S. et al.* // Phys. Rev. C. 1999. V. 60. P. 054614.
20. *Uzu E.* // nucl-th/0210026. 2002.
21. *Uzu E. et al.* // Proc. RCNP Workshop on Spin Polarized Nuclear Fusion (POLUSION99). Ed. M. Tanaka. 1999. RCNP, Osaka University. P. 30.
22. *Deltuva A., Fonseca A.* // Phys. Rev. C. 2010. V. 81. P. 054002.
23. *Tornow W.* // J. Phys. G. 2008. V. 35. P. 125104.
24. *Deltuva A., Fonseca A.C.* // Phys. Rev. C. 2007. V. 76. P. 021001(R).
25. *Hupin G.* // Nat. Commun. 2019. V. 10. P. 351.
26. *Tumino A. et al.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2013. V. 436. P. 012073.
27. *Komarov E.N., Sherman S.G.* // Preprint PNPI-2996. 2016. Gatchina. P. 58.
28. *Davydov A.S.* Teoriya atomnogo yadra [Theory of Atomic Nucleus]. 1958. Moscow: Fizmatgiz (in Russian).

The Study of $^2\text{H}(d, n)^3\text{He}$ and $^2\text{H}(d, p)^3\text{H}$ Nuclear Reactions with Polarized Deuteron Beams. PolFusion Experiment

A. Andreyanov^{1, *}, A. Vasilyev¹, M. Vznuzdaev¹, K. Ivshin¹, L. Kochenda¹, P. Kravchenko¹, P. Kravtsov¹, V. Larionov¹, S. Mikirtychyants¹, A. Rozhdestvensky¹, A. Solovov¹, I. Solovyev¹, V. Trofimov¹, V. Fotyev¹ and of the PolFusion collaboration

¹Petersburg Nuclear Physics Institute, National Research Center Kurchatov Institute, Gatchina, Leningrad oblast, 188300 Russia

*e-mail: andreyanov_av@pnpi.nrcki.ru

Received December 28, 2020; revised December 30, 2020; accepted January 14, 2021

The PolFusion experiment is under preparation at the National Research Center Kurchatov Institute — PNPI, in collaboration with Forschungszentrum Juelich, Germany, and INFN/University of Ferrara, Italy; the experiment will study the $^2\text{H}(d, n)^3\text{He}$ and $^2\text{H}(d, p)^3\text{H}$ reactions with a polarized beam and target at low energies up to 100 keV. In this experiment, the differential cross sections and spin-correlation coefficients will be measured for various beam and target polarizations. The status of the PolFusion experiment is discussed. The paper contains a brief review of the theoretical models that can be used to describe dd fusion. The mathematical calculations based on partial wave decomposition that can be used for processing the obtained experimental data are considered..

Keywords: dd-fusion, deuteron, polarization, partial wave decomposition