

ПРОЕКТ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ЯДЕРНОГО dd -СИНТЕЗА С ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ ИСХОДНЫХ ЧАСТИЦ ПРИ НИЗКИХ ЭНЕРГИЯХ (PolFusion)

© 2024 г. А. Ю. Рождественский^{1,*}, А. В. Андреев¹, А. А. Васильев¹, М. Е. Взнуздаев¹, К. А. Ившин¹, Л. М. Коченда¹, П. А. Кравцов¹, П. В. Кравченко¹, В. Е. Ларионов¹, А. Н. Соловьев¹, В. А. Трофимов¹, В. Д. Фотьев¹

Поступила в редакцию 27.11.2023 г.; после доработки 27.11.2023 г.; принята к публикации 23.12.2023 г.

Реакция ядерного dd -синтеза может протекать по трем возможным каналам: ${}^3\text{H} + p$ ($\approx 50\%$), ${}^3\text{He} + n$ ($\approx 50\%$), ${}^4\text{He} + \gamma$ ($\approx 10^{-7}\%$). Интерес к dd -синтезу вызван как со стороны фундаментальных исследований и астрофизики, так и прикладной науки, в частности, в области создания термоядерных реакторов. В 70-х годах в Курчатовском институте была предложена идея исследования реакции ядерного dd -синтеза с использованием поляризованных пучков дейтронов. Развитие данной идеи получило продолжение в ядерно-физическом эксперименте PolFusion (Polarized Fusion). Цель ядерно-физического эксперимента PolFusion — исследование реакции ядерного dd -синтеза с поляризованными исходными частицами в области низких энергий. В эксперименте планируется измерить асимметрии рассеяния продуктов реакций dd -синтеза в конечном состоянии при различной взаимной ориентации спинов сталкивающихся дейтронов в диапазоне энергий 10–100 кэВ. Авторами будет представлен обзор текущего статуса эксперимента.

DOI: 10.31857/S0044002724030094, EDN: IWHCKX

1. ВВЕДЕНИЕ

Реакции ${}^2\text{H}(d, p){}^3\text{H}$ и ${}^2\text{H}(d, n){}^3\text{He}$ при низких энергиях представляют большой интерес для ядерной физики малонуклонных систем. Решающую роль в таких исследованиях играют поляризованные эксперименты, которые могут дать исчерпывающую информацию для детального теоретического анализа, целью которого является разработка новых теоретических моделей, которые могли бы описать новые экспериментальные данные.

В 70-х годах в Курчатовском институте Б.П. Адьясевичем и В.Г. Антоненко была предложена идея исследования реакции ядерного dd -синтеза с использованием поляризованных пучков дейтронов [1]. В качестве реализации данной идеи был предложен эксперимент по измерению асимметрий и коэффициентов корреляции поляризаций в реакции dd -синтеза при энергиях меньше 100 кэВ [2]. К настоящему моменту успехи в развитии физики поляризованных атомарных и ионных источников позволили достичь необходимого технологического уровня для проведения подобного эксперимента. Таким образом, развитие данной идеи получило продолжение в ядерно-физическом эксперименте PolFusion (Polarized Fusion).

Актуальность исследования реакций ${}^2\text{H}(d, p){}^3\text{H}$ и ${}^2\text{H}(d, n){}^3\text{He}$ при низких энергиях заключается не только в расширении фундаментальных знаний, но

и в возможности применимости полученных данных в прикладной и реакторной физике [3]. Данные реакции являются элементами цепочки первичного нуклеосинтеза в теории Большого Взрыва, а также протекают на ранних фазах горения звезд [4]. В мировом научном сообществе ведется активное обсуждение теоретических моделей данных реакций, результатом которого могут стать новые представления о протекании ядерных реакций в области низких энергий и возможности осуществления холодного ядерного синтеза [5].

Новые результаты астрофизических исследований привели к уменьшению ошибки оценки первичного распределения изотопов. В том числе результаты серии работ коллаборации LUNA показали, что основным источником неопределенности в вычислении первичного распределения дейтерия в момент Большого Взрыва стала сравнительная недостаточность экспериментальных данных по неполяризованному dd -синтезу [6].

Анализ последних астрофизических экспериментов показал расхождение в вычислении астрофизического S -фактора для n - и p -каналов, а также отсутствие согласия между теоретическими предсказаниями и результатами измерений [7, 8]. На данный момент существуют различные теоретические модели, позволяющие рассчитать ядерные реакции, каждая из которых имеет ограниченную область применимости, а также содержат существенные недостатки, такие как, например, отсутствие привязки параметров к физическим характеристикам (R-MATRIX) или игнорирование внутренней структуры ядра (Potential/optical

¹) НИЦ “Курчатовский институт” — ПИЯФ, Гатчина, Россия

* E-mail: anroz@mail.ru

model) [9]. Отсутствие общей теоретической модели ядерных реакций стимулирует проведение новых экспериментов по измерению сечений ядерных реакций синтеза.

Привлекательность термоядерных реакций с точки зрения энергетических прикладных аспектов заключается в том, что на данный момент предпринимаются попытки создать энергетические установки, в которых управляемым образом могут осуществляться реакции ядерного синтеза [10, 11]. При проектировании термоядерных энергетических установок важным аспектом является исследование углового распределения продуктов ядерного синтеза, в частности нейтронов. Расчеты по влиянию поляризованного топлива на распределение нейтронных потоков внутри камеры токамака указывают на заметную разницу для полной параллельной или антипараллельной поляризации для углового распределения нейтронов в поперечном направлении (R-матричный анализ) [12].

Одним из прикладных направлений исследования реакции ядерного dd -синтеза является использование данной реакции для возможной наработки трития.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ PolFusion

На основе идеи [1] в Петербургском институте ядерной физики (Гатчина) был предложен эксперимент по исследованию реакции ядерного dd -синтеза с поляризованными исходными компонентами в области низких энергий. В эксперименте будут измерены спин-корреляционные коэффициенты и анализирующие способности (асимметрии) реакций dd -синтеза при различной взаимной ориентации спинов сталкивающихся дейтронов в диапазоне энергий 10–100 кэВ.

Схема на рис. 1 является общим обзором всех экспериментов по изучению реакции ядерного dd -синтеза. В левой части схемы приведены тип эксперимента (какие реакции изучались, а также тип поляризации) и наблюдаемые, которые измерялись в каждом эксперименте. По центру в виде цветовой диаграммы приведен диапазон энергий для каждого эксперимента, а также указано, какой именно канал реакции был изучен. Сверху схемы приведена формула полного сечения для наглядного отображения измеряемых наблюдаемых.

Таким образом, эксперимент PolFusion является не только продолжением серии экспериментов по исследованию реакции ядерного dd -синтеза, но и первым экспериментом с пучком и мишенью, поляризованными по ядерному спину. Он позволит определить вклад сечения поляризованного синтеза в полное сечение реакции при низких энергиях. В эксперименте планируется измерение дифференциального сечения ядерной реакции синтеза поляризованных дейтронов, а также измерение асимметрии дифференциального сечения и спин-корреляционных коэффициентов.

2.1. Экспериментальная установка

Общий вид экспериментальной установки приведен на рис. 2. Атомарный и ионный поляризованный источники взаимно ориентированы под прямым углом таким образом, чтобы реакция ядерного dd -синтеза протекала в центре 4π -детектора. Поляриметр на асимметрии ядерной реакции и поляриметр на Лэмбовском сдвиге, используемые для определения поляризации, располагаются на выходных пучках ионного и атомарного поляризованных источников соответственно [13].

Основными элементами экспериментальной установки по исследованию ядерного dd -синтеза являются: источник поляризованных ионов (POLIS) с энергией ионного пучка 10–50 кэВ и током 15 мкА (параметры сопла: $d = 1.3$ мм, $T = 65$ К), а также источник поляризованных атомов (ABS) с энергией атомарного пучка 0.01 эВ и интенсивностью 4×10^{16} атомов/с (параметры сопла: $d = 2$ мм, $T = 65$ –85 К), система поляриметрии, детекторная система и система сбора данных. Конструкции поляризаторов атомарного и ионного источников позволяют получать различные виды поляризации, однако в рамках данного исследования наибольший интерес представляют чисто тензорные ($p_z = 0$, $p_{zz} = \pm 1$) и чисто векторные ($p_z = \pm 2/3$, $p_{zz} = 0$) поляризации. Расчетная степень поляризации составляет 90%.

Центральная детекторная система представляет собой кубическую структуру, внутренняя поверхность которой заполнена кремниевыми PIN-диодами (по 96 PIN-диодов на каждую грань куба). Детекторная система способна регистрировать все заряженные продукты реакции с эффективностью 50%.

В процессе подготовки эксперимента был проведен набор тестовых измерений с использованием различных типов мишеней (твердотельной и паровой). На рис. 3 представлен амплитудный спектр, полученный при энергии налетающих дейтронов 25 кэВ. Спектры амплитуд, полученные в данном тестовом запуске, приводятся для трех различных значений зенитного угла $\theta = 106^\circ$, 116° , 157° [14] (рис. 3а). На координатной схеме детектора рис. 3б отмечены выбранные угловые направления, которые соответствуют PIN-диодам под углами $\theta = 106^\circ$, 116° , 157° .

2.2. Система сцинтилляционных детекторов

Основным источником фона при регистрации заряженных продуктов реакции в центральном детекторе является космическое излучение. Особенно критично данный эффект наблюдается при регистрации ${}^3\text{He}^{2+}$ (рис. 3а). Для уменьшения влияния космического излучения и выделения пиков ${}^3\text{He}^{2+}$ из результирующего спектра было предложено разработать систему подавления фона.

Для подавления фона от космических мюонов была предложена система из пяти сцинтилляционных пластин, размещенных в одном вакуумном объеме с глав-

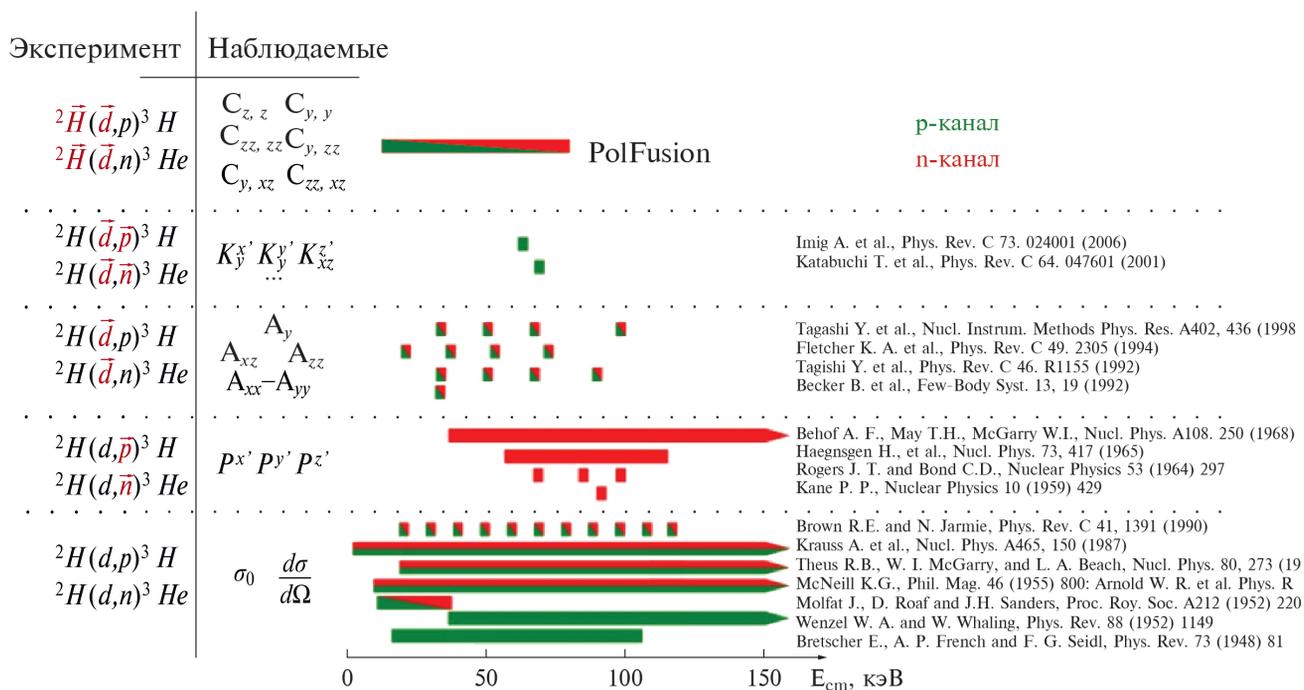


Рис. 1. История исследования ядерного dd -синтеза.

ным детектором и работающих по схеме антисовпадений. Сцинтилляционные пластины окружают главный детектор таким образом, чтобы обеспечить максимальное перекрытие граней главного детектора, а также для получения максимальной эффективности регистрации космического излучения в данной конфигурации. Принципиальный вид системы сцинтилляционных детекторов представлен на рис. 4.

С помощью программного пакета Geant 4 была построена система сцинтилляционных детекторов и описана геометрия центрального детектора (рис. 5). Спектр, полученный в результате работы программы без включенного алгоритма антисовпадений, приведен на рис. 6а. Полученный результат хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными в тестовом сеансе 2020 г., что говорит о корректности построенной модели и правильном учете физических эффектов и факторов, влияющих на конечный энергетический спектр.

Энергетический спектр продуктов реакции ядерного dd -синтеза с учетом работы алгоритма антисовпадений для двух любых из пяти сцинтилляционных пластин и PIN-диодов приведен на рис. 6б. Расчеты показывают, что общая эффективность подавления фона космического излучения составляет 73.5%. Эффективность подавления для угловых направлений 157° и 116° выше среднего и составляет порядка 85%, а для 106° существенно ниже и составляет около 28%. Данный результат объясняется отсутствием в конфигурации разработанной системы верхней сцинтилляционной пластины. Мюоны с траекториями, перпендикулярными верхней и нижней граням главного 4л-

детектора, взаимодействуют с PIN-диодами, но не попадают в алгоритм антисовпадений и оказывают сильное влияние на результирующий спектр.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проводимого эксперимента по исследованию реакции ядерного dd -синтеза с поляризацией исходных частиц в тестовом сеансе 2020 г. на паровой мишени был зарегистрирован неполяризованный dd -синтез. В настоящее время ведется запуск атомарного источника для получения dd -синтеза на поляризованных пучках. К настоящему моменту смоделирована система сцинтилляционных детекторов для подавления фона космического излучения и ведется ее разработка. В ближайшее время планируется:

- Измерение неполяризованных сечений при энергии 20–70 кэВ и получение отношения сечений p - и n -каналов.
- Измерение асимметрий при различных состояниях поляризации исходных пучков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. Adjasevich and V. Antonenko, Preprint IEA-2704 (Moscow, 1976).
2. Н. Paetz gen. Schieck, Eur. Phys. J. A **44**, 321 (2010).
3. D. Casey *et al.*, Nat. Phys. **13**, 1227 (2017).
4. В. Бедняков, ЭЧАЯ **33**, 915 (2002).
5. C. Berlinguette, Y. Chiang, J. Munday, *et al.*, Nat. **570**, 45 (2019).

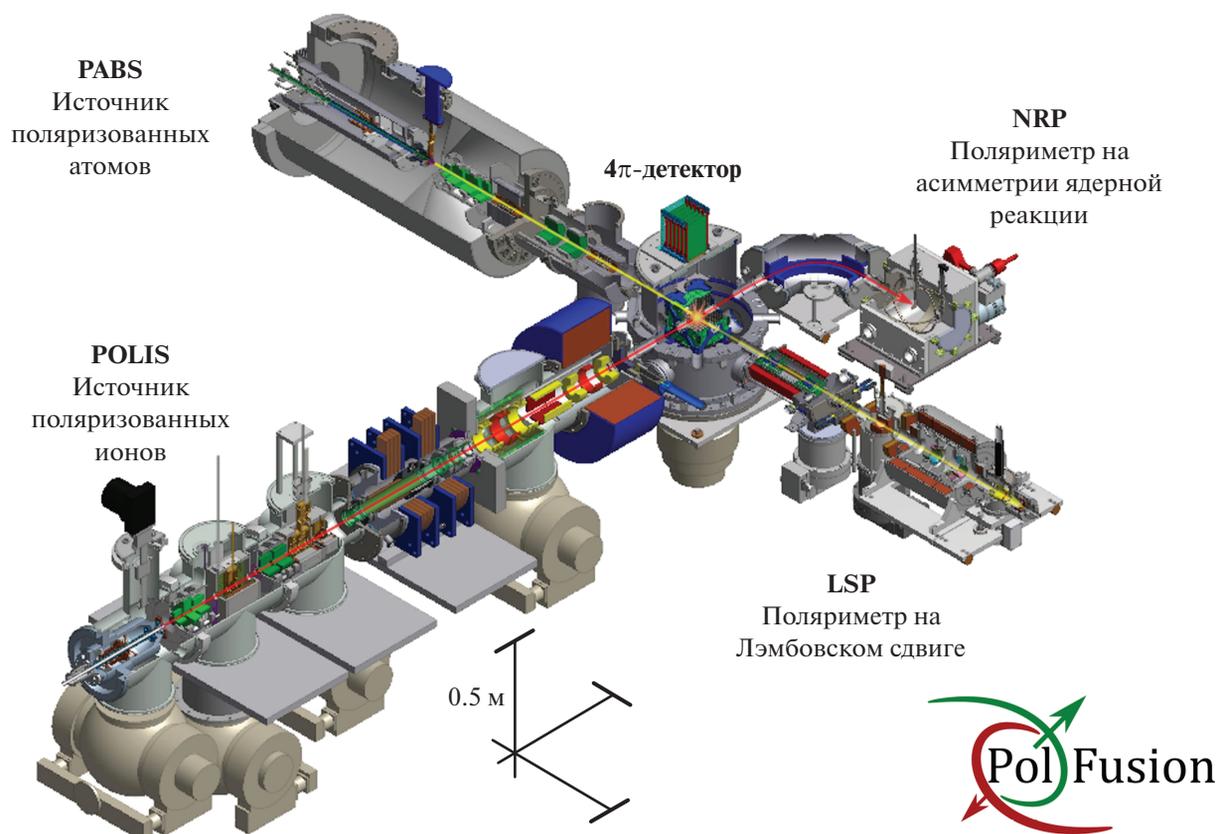


Рис. 2. Экспериментальная установка.

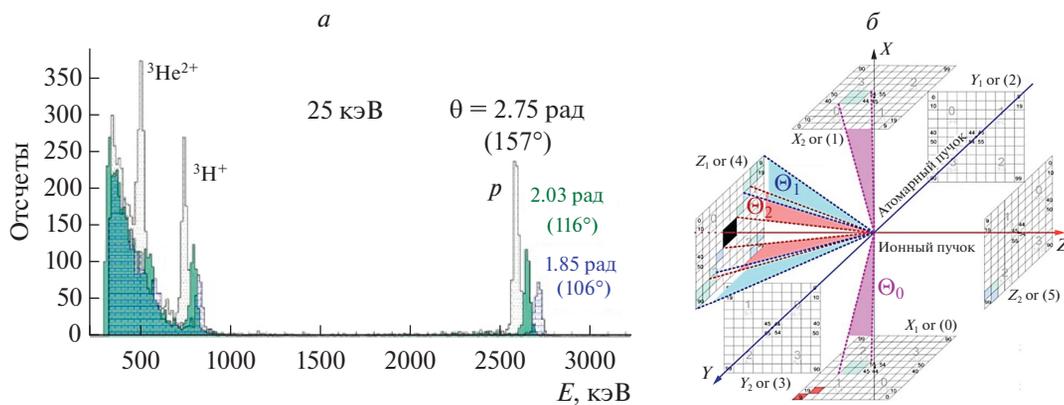


Рис. 3. Амплитудный спектр тестового сеанса 2020 г. (а) и координатная система детектора (б).

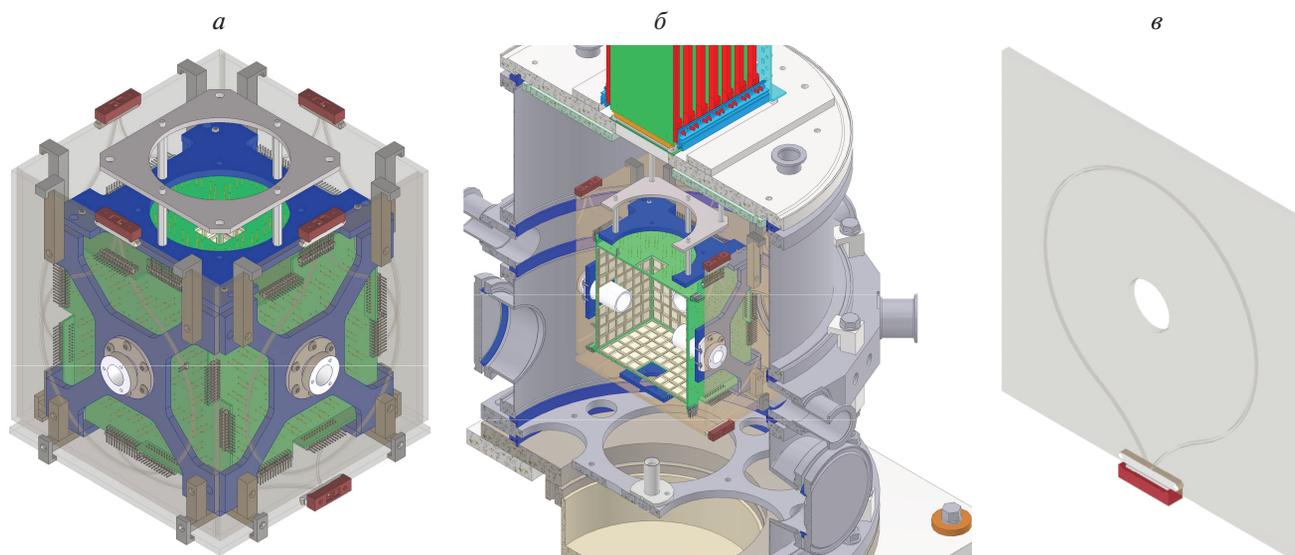


Рис. 4. Модель детекторной системы: *a* — центральный детектор и сцинтилляционные пластины; *б* — детекторная система внутри вакуумного объема; *в* — сцинтилляционная пластина с WLS-волокном.

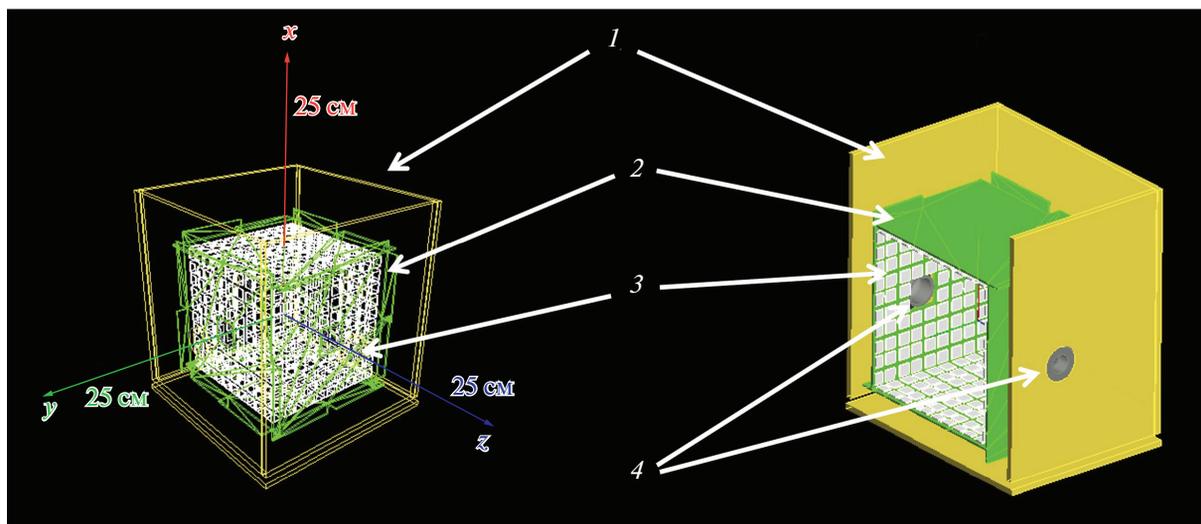


Рис. 5. Модель детекторной системы, смоделированная в программном пакете Geant 4: схематичное изображение (слева) и вид в разрезе (справа). Цифрами на рисунке обозначены основные элементы модели: 1 — сцинтилляционные панели; 2 — печатные платы; 3 — PIN-диоды; 4 — втулки для защиты шлейфов.

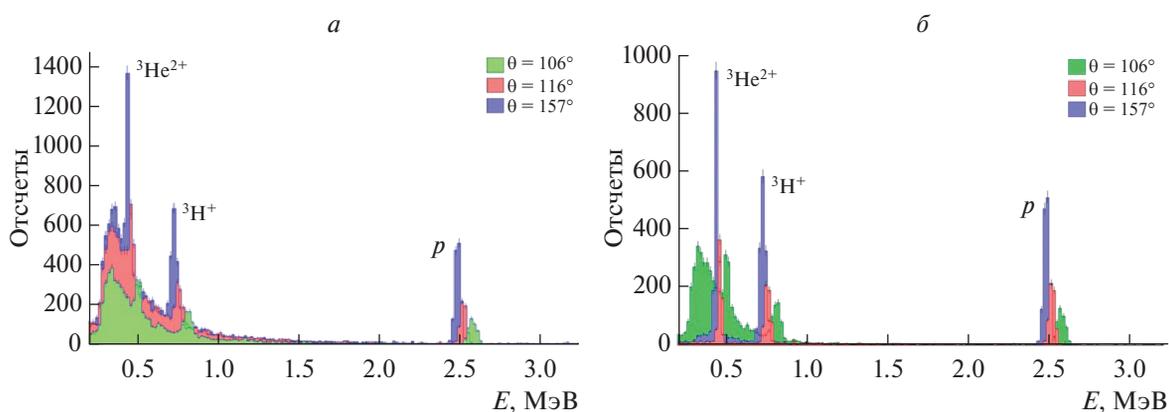


Рис. 6. Энергетический спектр с фоном космического излучения, полученный в программном пакете Geant 4 (а). Энергетический спектр продуктов реакции dd -синтеза с учетом работы алгоритма антисовпадений для двух любых сцинтилляционных пластин и PIN-диодов (б).

6. T. Yeh, K. Olive, and B. Fields, JCAP **03**, 046 (2021); arXiv: 2011.13874 [astro-ph.CO].
7. O. Pisanti, G. Mangano, G. Miele, and P. Mazzella, JCAP **04**, 020 (2021); arXiv: 2011.11537 [astro-ph.CO].
8. K. Arai, S. Aoyama, Y. Suzuki, P. Descouvemont, and D. Baye, Phys. Rev. Lett. **107**, 132502 (2011).
9. D. Pierre, EPJ Web Conf. **117**, 9001 (2016).
10. Ch. Leemann *et al.*, Helv. Phys. **44**, 141 (1971).
11. G. Hupin *et al.*, Nature Com. **10**, 321 (2019).
12. W. Yang *et al.*, Fus. Sci. Technol. **78**, 164 (2022).
13. G. Ciullo, R. Engels, M. Muescher, and A. Vasilyev, Nuclear Fusion with Polarized Fuel, Springer Proceedings in Physics, Volume 187 (August 2016); doi: 10.1007/978-3-319-39471-8.
14. A. Solovyev *et al.*, JINST **15**, C08003 (2020).

PROJECT ON RESEARCH OF NUCLEAR dd -SYNTHESIS WITH POLARIZATION OF INITIAL PARTICLES AT LOW ENERGIES (PolFusion)

A. Rozhdestvenskij¹⁾, A. Andreyanov¹⁾, A. Vasilyev¹⁾, M. Vznuzdaev¹⁾, K. Ivshin¹⁾, L. Kochenda¹⁾,
P. Kravtsov¹⁾, P. Kravchenko¹⁾, V. Larionov¹⁾, A. Solovyev¹⁾, V. Trofimov¹⁾, V. Fotyev¹⁾

¹⁾NRC "Kurchatov Institute" — PNPI, Gatchina, Russia

The nuclear dd -fusion reaction can proceed by three possible channels: ${}^3\text{H} + p$ ($\approx 50\%$), ${}^3\text{He} + n$ ($\approx 50\%$), ${}^4\text{He} + \gamma$ ($\approx 10^{-7}\%$). Interest in dd -fusion has been aroused by both fundamental research and astrophysics and applied science, particularly in the field of fusion reactor development. In the 1970s at the Kurchatov Institute, the idea of studying the nuclear dd -fusion reaction using polarized deuteron beams was proposed. The development of this idea was continued in the PolFusion (Polarized Fusion) nuclear physics experiment, which aims to study the reaction of nuclear dd -synthesis with polarized source particles in the low energy region. The experiment is planned to measure the scattering asymmetries of dd -fusion reaction products in the final state at different mutual orientation of the spins of colliding deuterons in the energy range 10—100 keV. The authors will present an overview of the status of the experiment.