

# РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В РАМКАХ ПРОЕКТА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ РЕАКЦИИ ЯДЕРНОГО $dd$ -СИНТЕЗА С ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ ИСХОДНЫХ ЧАСТИЦ ПРИ НИЗКИХ ЭНЕРГИЯХ (PolFusion)

*А. Ю. Рождественский*<sup>1,\*</sup>, *А. А. Васильев*<sup>1</sup>,  
*М. Е. Взнуздаев*<sup>1</sup>, *Л. М. Коченда*<sup>1</sup>, *П. А. Кравцов*<sup>1</sup>,  
*П. В. Кравченко*<sup>1</sup>, *В. Е. Ларионов*<sup>1</sup>, *В. А. Трофимов*<sup>1</sup>,  
*В. Д. Фотьев*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова  
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,  
Гатчина, Россия

Представлены результаты разработки системы сцинтилляционных детекторов для подавления космического излучения в эксперименте по изучению реакций ядерного  $dd$ -синтеза с низкой энергией пучка (PolFusion). Целью ядерно-физического эксперимента PolFusion, осуществляемого в Петербургском институте ядерной физики (Гатчина), является изучение реакции синтеза  ${}^2\text{H}(d,p){}^3\text{H}$  и  ${}^2\text{H}(d,n){}^3\text{He}$  с поляризацией исходных частиц при низких энергиях — в диапазоне 10–100 кэВ. Работа состоит из следующих этапов: моделирование центральной и сцинтилляционной детекторных систем эксперимента PolFusion, разработка конструкции сцинтилляционной детекторной системы и тестовые измерения космического излучения.

The development of a system of scintillation detectors is presented for cosmic-ray suppression in the experiment aimed at studying  $dd$ -fusion reactions with the low beam energy (PolFusion). The goal of the PolFusion experiment, which is carried out at the Petersburg Nuclear Physics Institute (Gatchina), is to investigate the fusion reaction of  ${}^2\text{H}(d,p){}^3\text{H}$  and  ${}^2\text{H}(d,n){}^3\text{He}$  with polarization of both initial particles at low energies in the range of 10–100 keV. The study includes the following stages: simulation of the central detector system and the scintillation detector system of the PolFusion experiment, design and development of the scintillation detector system, and the test measurements of cosmic rays.

PACS: 29.40.Mc

---

\* E-mail: anrozhd@mail.ru

## ВВЕДЕНИЕ

В 1970-х гг. в Курчатовском институте Б. П. Адыяевичем 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 в реакции *dd*-синтеза при энергиях меньше 100 кэВ [2]. К настоящему времени 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), в котором будут измерены спин-корреляционные коэффициенты реакций *dd*-синтеза при различной взаимной ориентации спинов сталкивающихся дейтронов в диапазоне энергии 10–100 кэВ.

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Общий вид экспериментальной установки приведен на рис. 1. Атомарный и ионный поляризованные источники взаимно ориентированы под прямым углом таким образом, чтобы реакция ядерного *dd*-синтеза протекала в центре 4 $\pi$ -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 [3].

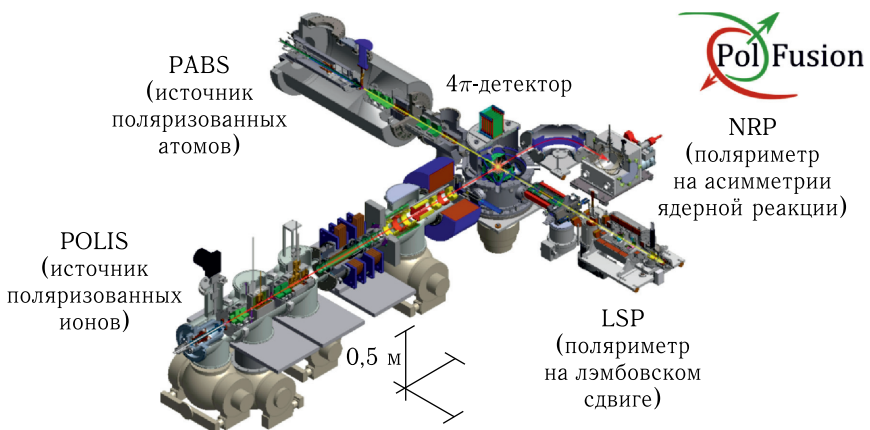


Рис. 1. Экспериментальная установка PolFusion

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 мишеней различных типов (твердотельной и паровой). Спектры амплитуд, полученные в данном тестовом запуске при энергии налетающих дейтронов, равной 25 кэВ, приводятся для трех различных значений зенитного угла  $\theta = 106, 116, 157^\circ$  (см. рис. 4, а) [4].

## 2. ПРИНЦИПАЛЬНАЯ СХЕМА И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Основным источником фона при регистрации заряженных продуктов реакции в центральном детекторе является космическое излучение. Особенно критичным данный эффект наблюдается при регистрации  ${}^3\text{He}^{2+}$ . Для уменьшения влияния космического излучения и определения количества событий  ${}^3\text{He}^{2+}$  было предложено разработать систему подавления фона [5].

Система подавления фона космических мюонов включает в себя пять сцинтилляционных пластин, в каждую из которых вклеено спектросмещающее волокно (WLS-волокно). Сцинтилляционные пластины размещаются в одном вакуумном объеме с главным детектором и работают

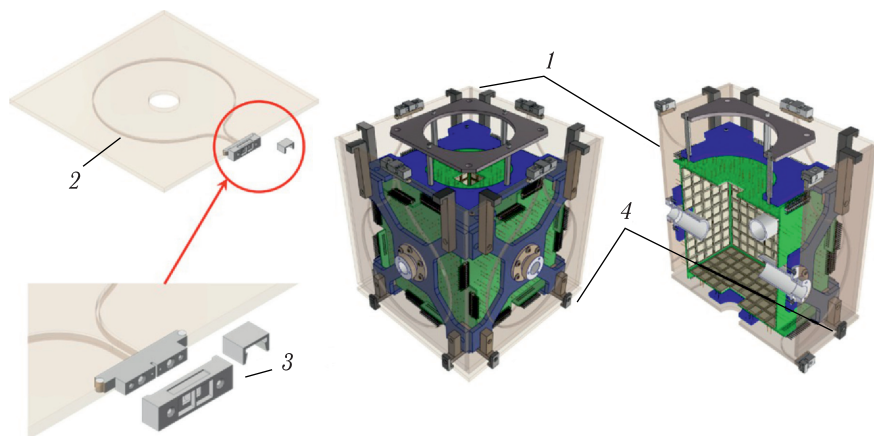


Рис. 2. Модель системы сцинтилляционных детекторов, выполненная в программном пакете Autodesk Inventor: 1 — сцинтилляционные пластины; 2 — WLS-волокно; 3 — разъем для присоединения кремниевого фотоумножителя (SiPM); 4 — крепление сцинтилляционных пластин к центральной детекторной системе

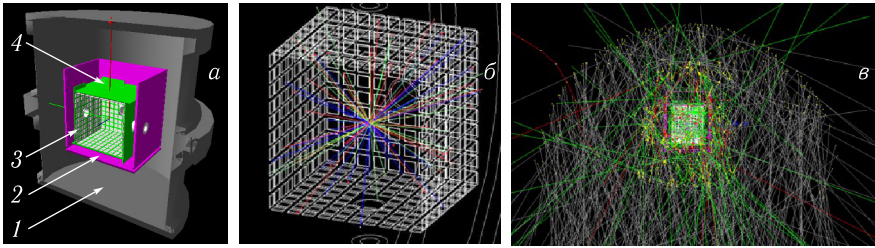


Рис. 3 (цветной в электронной версии). Модель детекторной системы, построенная в программном пакете Geant4: а) геометрия детекторной системы (1 — вакуумная камера; 2 — сцинтилляционные пластины; 3 — PIN-диоды; 4 — печатные платы); б) визуализация сгенерированных траекторий продуктов реакции (красный цвет —  $p^+$ , синий —  ${}^3\text{H}^+$ , зеленый —  ${}^3\text{He}^{2+}$ ); в) визуализация траекторий мюонов

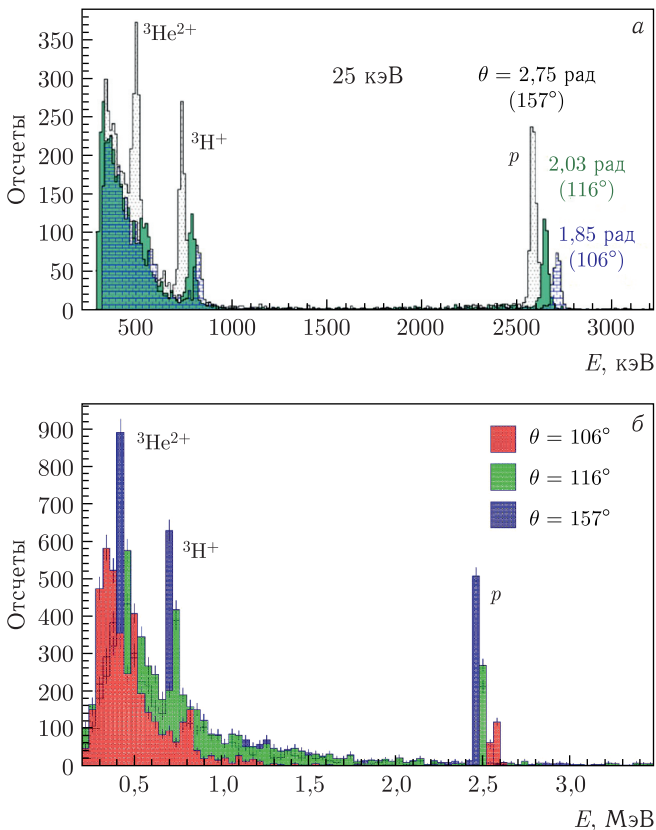


Рис. 4. Энергетический спектр продуктов реакции  $dd$ -синтеза, полученный в эксперименте (а) и при моделировании в Geant4 (б)

по схеме антисовпадений. Форма и расположение пластин выбирались таким образом, чтобы обеспечить полное перекрытие граней главного детектора, а также с целью получения максимальной эффективности регистрации космического излучения в данной конфигурации. Для оптимального светосбора с WLS-волокна, а также по причине расположения всей системы в вакууме в качестве фотоэлемента был выбран кремниевый фотоумножитель (SiPM). Принципиальный вид системы сцинтилляционных детекторов представлен на рис. 2.

С помощью программного пакета Geant4 описана геометрия системы сцинтилляционных детекторов и центрального детектора (рис. 3, *a*), а также заданы соответствующие материалы для получения точных данных о взаимодействии мюонов и продуктов реакции с веществом детекторной системы. Смоделированы отклики детекторов и тепловые шумы для получения правильных энергетических спектров. Для описания вылета продуктов реакции написан программный код, определяющий физический генератор, визуализация траекторий частиц которого приведена на рис. 3, *б*. В качестве генератора космических мюонов использован генератор EсоMug [6], учитывающий энергетическое и пространственное распределение мюонов у поверхности Земли (рис. 3, *в*).

Энергетический спектр, полученный в результате моделирования, приведен на рис. 4, *б*. Полученный результат хорошо согласуется с данными экспериментального сеанса 2020 г. (рис. 4, *а*), что говорит о корректности построенной модели и правильном учете физических эффектов и факторов, влияющих на конечный энергетический спектр.

### 3. СИСТЕМА СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ

На основе разработанной принципиальной схемы и проведенного моделирования была собрана система сцинтилляционных детекторов. Сборка одной сцинтилляционной пластины с WLS-волокном и двумя кремниевыми фотоумножителями приведена на рис. 5.

В качестве фотоумножителя был выбран SiPM Onsemi MicroFJ-30035-TSV, имеющий рабочую область  $3 \times 3$  мм. Разъемы для SiPM были изготовлены с использованием технологии DLP-печати. Для тестирования системы вне вакуумного объема и оценки эффективности работы собрана тестовая сборка, обозначенная цифрой 5 на рис. 5.

Для питания SiPM и усиления сигнала была разработана специальная электрическая схема, выполненная в виде печатной платы (рис. 6). Плата включает в себя 12 каналов, каждый из которых питает по одному SiPM и имеет точную подстройку по питанию. Также на плате располагаются 12 каналов усиления сигналов SiPM с коэффициентом усиления, равным 10.

На плате располагаются два 28-пиновых разъема для соединения с платой ASF48 CROS3 мезонинным способом. Для согласования выход-

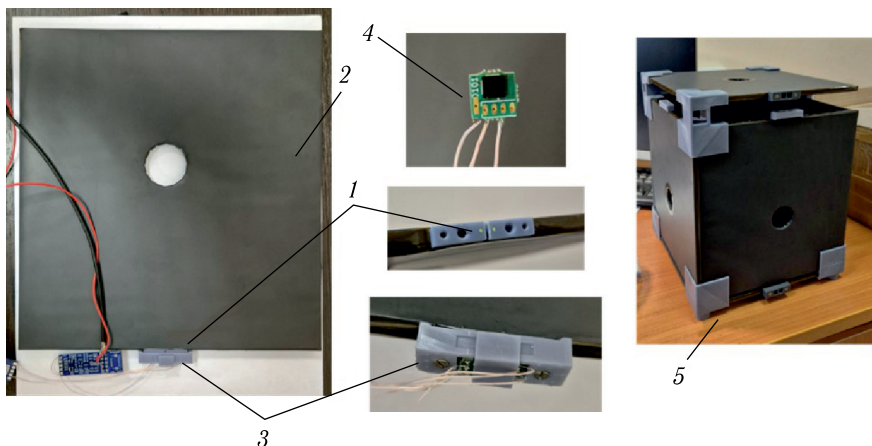


Рис. 5. Сборка одной сцинтилляционной пластины: 1 — WLS-волокно; 2 — сцинтилляционная пластина; 3 — крепление для двух SiPM; 4 — SiPM Onsemi MicroFJ-30035-TSV; 5 — сборка системы для тестирования вне вакуума

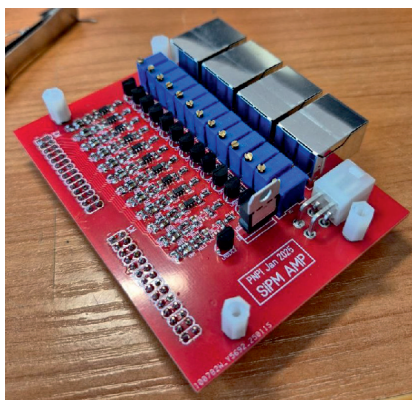


Рис. 6. Плата питания SiPM и усиления сигнала

ного сигнала разработанной электроники с платой ASF48 ноль выходного сигнала был поднят на +1,65 В.

В качестве тестового запуска разработанной системы была проведена проверка на срабатывание всех детекторов в режиме совпадения (рис. 7): шесть сцинтилляционных пластин были размещены одна над другой (рис. 7, б), а сбор данных проводился с помощью CROS3 (рис. 7, а). Одиночный сигнал от одного из детекторов и результат одно-временного срабатывания всех каналов на космический мюон приведены на рис. 7, в, г.

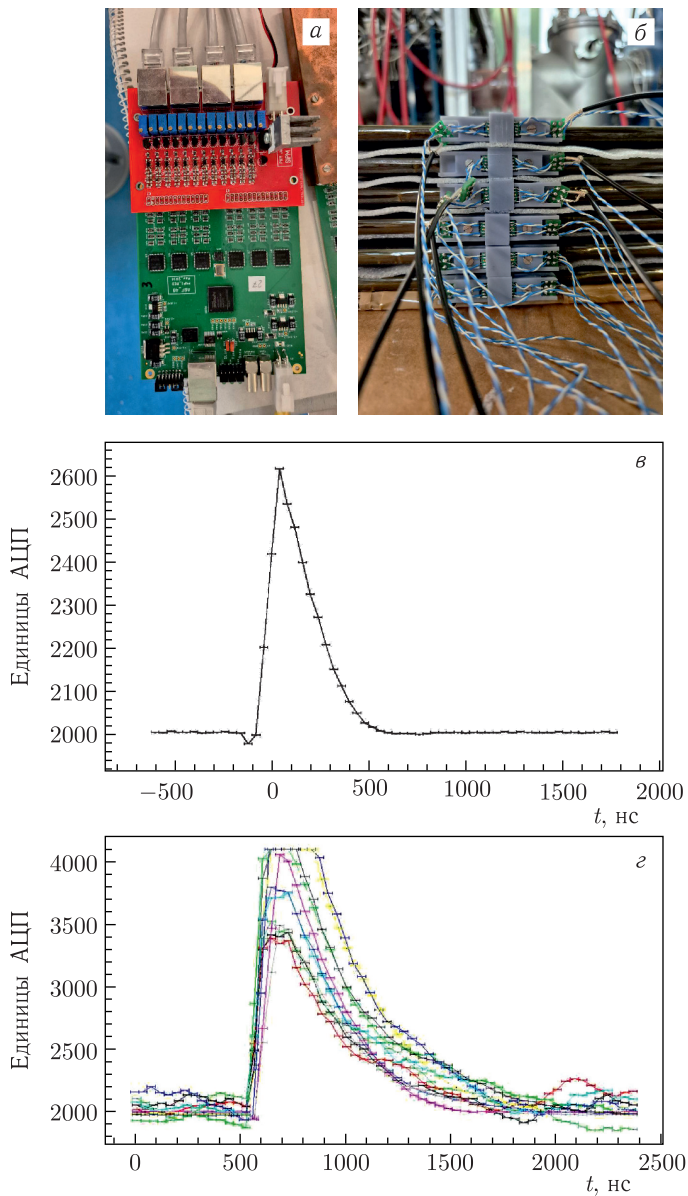


Рис. 7. Тестирование системы сцинтилляционных детекторов на совпадение: а) подключение электроники к плате ASF48 CROSS3; б) шесть пластин системы, расположенных горизонтально; в, г) одиночный сигнал SiPM (в) и одновременное срабатывание всех 12 SiPM (г) при регистрации космического мюона

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках решения задачи по разработке системы сцинтилляционных детекторов было проведено моделирование системы в программном пакете Geant4, создана сборка из шести сцинтилляционных пластин и разработана уникальная электроника. К настоящему времени проведена проверка регистрации космического излучения всеми сцинтилляционными пластинами на воздухе и осуществляется оценка эффективности системы. В ближайшее время планируется провести набор статистики космического излучения, разместить разработанную систему в вакуумной камере главного детектора, а также получить данные по подавлению космического излучения во время экспериментального сеанса проекта PolFusion.

**Финансирование.** Данная работа финансировалась за счет средств бюджета института. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

**Конфликт интересов.** Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Adjasevich B., Antonenko V.* Measurements of the Polarization Correlation Coefficients in Reactions  $d(d,p)t$  and  $d(d,n)^3\text{He}$ . Preprint IEA-2704. М., 1976.
2. *Paetz gen. Schieck H.* The Status of "Polarized Fusion" // *Eur. Phys. J. A.* 2010. V. 44. P. 321–354.
3. *Ciullo G., Engels R., Muescher M., Vasilyev A.* Nuclear Fusion with Polarized Fuel // *Springer Proc. Phys.* 2016. V. 187; <https://doi.org/10.1007/978-3-319-39471-8>.
4. *Soloviyev A. et al.* Optimization and First Tests of the Experimental Setup to Investigate the Double-Polarized  $DD$ -Fusion Reactions // *J. Instrum.* 2020. V. 15. P. C08003.
5. *Rozhdestvenskij A. Yu., Andreyanov A. V., Vasilyev A. A. et al.* Project on Research of Nuclear  $dd$  Synthesis with Polarization of Initial Particles at Low Energies (PolFusion) // *Phys. At. Nucl.* 2024. V. 87, No. 3. P. 224–229.
6. *Pagano D. et al.* EcoMug: An Efficient COsmic MUon Generator for Cosmic-Ray Muon Applications // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2021. V. 1014. P. 165732; <https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165732>.