

УДК 524.1

ФЛУОРЕСЦЕНТНЫЙ ДЕТЕКТОР КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ПРОЕКТА EUSO-SPB2

© 2024 г. А. А. Белов^{1, 2}, П. А. Климов¹, Д. А. Трофимов^{1, 2, 3, *}
от имени коллаборации JEM-EUSO

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова”, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына”, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова”, Физический факультет, Москва, Россия

³Университет Париж Сите, Лаборатория космических частиц и космологии, Париж, Франция

*E-mail: daniil@eas.sinp.msu.ru

Поступила в редакцию 24.05.2023

После доработки 15.11.2023

Принята к публикации 30.11.2023

Описан баллонный эксперимент EUSO-SPB2 для исследования космических лучей сверхвысоких и предельно высоких энергий, а также астрофизических нейтрино высоких энергий, приведены основные характеристики флуоресцентного и черенковского телескопа проекта. В рамках предполетной подготовки проведена калибровка многоканального фотоприемника.

DOI: 10.31857/S0367676524030222, EDN: QKPKKE

ВВЕДЕНИЕ

EUSO-SPB2 (The Extreme Universe Space Observatory on a Super Pressure Balloon 2) — стратосферный баллонный эксперимент, реализуемый в рамках программы JEM-EUSO [1] в целях верификации методики регистрации космических лучей сверхвысоких и предельно высоких энергий ($E > 1$ ЭэВ) методом измерения флуоресценции широкого атмосферного ливня (ШАЛ), а также нейтрино высоких энергий ($E > 10$ ПэВ) по черенковскому излучению ШАЛ [1]. Для решения этих задач в состав научной аппаратуры проекта входят два телескопа: флуоресцентный, направленный в нади́р, и черенковский — на лимб. Планируемое время запуска стратосферной обсерватории — весна 2023 г. Измерения будут проводиться на высоте 33 км в течение ~100 дней при движении баллона в циркумполярном вихре.

Флуоресцентный телескоп проекта EUSO-SPB2 позволит провести первые измерения ШАЛ от космических лучей предельно высоких энергий (КЛ ПВЭ) из суборбитального пространства, что является важным шагом перед запуском более масштабных космических миссий, таких как K-EUSO (“КЛПВЭ”) [2, 3] или РОЕММА (Probe of Extreme Multi-Messenger Astrophysics) [4].

Второй телескоп предназначен для регистрации черенковского свечения восходящих ШАЛ,

вызванных космическими лучами высоких энергий, проходящих атмосферу по касательной или нейтрино, прошедших через земную кору. Эти измерения позволят измерить фоновые сигналы в целях обнаружения нейтрино-индуцированных восходящих ШАЛ для дальнейших проектов, а также осуществить поиск нейтрино от транзиентных астрофизических событий (например, при слиянии двойных нейтронных звезд) [5].

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕЛЕСКОПОВ

Флуоресцентный телескоп построен по схеме камеры Шмидта и имеет сегментированное зеркало с радиусом кривизны 1659.8 мм и эффективным фокусным расстоянием 860 мм (рис. 1). Диаметр входного отверстия телескопа составляет 1 м [6]. Фокальная поверхность состоит из трех модулей фотоприемника и представляет собой матрицу многоанодных фотоэлектронных умножителей (МАФЭУ), общее количество каналов регистрации — 6912 [7]. Каждый модуль состоит из 36 МАФЭУ фирмы Hamamatsu, собранных по четыре единицы в элементарные ячейки, имеющие единую систему высоковольтного питания. Временное разрешение телескопа составляет 1 мкс, поле зрения — $37.4^\circ \times 11.4^\circ$, поле зрения отдельного канала фотоприемника — $0.2^\circ \times 0.2^\circ$. Ожидаемая частота регистрации событий при таких

параметрах детектора составляет 0.12 ± 0.01 соб./ч, или ~ 0.6 событий за ночь (“окно” наблюдений — 5 ч) при энергетическом пороге $10^{18.2}$ эВ [5, 8].

Электроника модулей EUSO-SPB2 содержит модуль аналогово-цифрового преобразования сигнала, который осуществляет счет фотоэлектронов с помощью СБИС SPACIROC-3, блок цифровой обработки данных БЦОД на основе системы на кристалле Zynq фирмы XILINX и модуль высокого напряжения (HVPS). SPACIROC3 — это специализированная микросхема, предназначенная для осуществления счета фотоэлектронных импульсов за определенное время. Основа микросхемы — амплитудный дискриминатор, который обеспечивает отбор однофотоэлектронных импульсов в соответствии с выставленными порогами детектирования. Есть два вида порогов: DAC10, который задается для каждого МАФЭУ, и DAC7, индивидуальный для каждого канала регистрации. Установка индивидуальных порогов позволяет оптимизировать эффективность регистрации каждого канала отдельно.

БЦОД отвечает за прием и обработку данных, буферизацию, настройку SPACIROC-3 и реализацию алгоритмов запуска программы измерений. Этот блок также управляет источником высокого напряжения, чтобы в режиме реального времени управлять усилением МАФЭУ при резком изменении интенсивности светового сигнала.

Электроника модулей фотоприемника более подробно описана в работе [7]. Модули с такой же конструкцией будут использованы в орбитальном проекте K-EUSO.

Оптическая система черенковского телескопа основана на системе Шмидта, как и у флуоресцентного телескопа, однако камера выполнена на

основе кремневых фотоумножителей. Всего в камере 512 каналов регистрации, поле зрения каждого пиксела — $0.4^\circ \times 0.4^\circ$ (общее поле зрения — $6.4^\circ \times 12.8^\circ$), временное разрешение — 10 нс. Энергетический порог регистрации — 1 ПэВ [9].

КАЛИБРОВОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

На данном этапе работы над проектом была проведена сборка фотоприемника флуоресцентного телескопа, настройка пороговых дискриминаторов для каждого канала регистрации, а также исследования однородности матрицы и калибровка.

Калибровка проводится в специальном светонепроницаемом боксе, внутри которого установлен фотоприемник, источник света в интегрирующей сфере Labsphere (создающей равномерное освещение фотоприемника и выполняющей функцию делителя светового потока), измеритель мощности Ophir Laserstar с двумя калиброванными фотодиодами (один располагается внутри сферы, другой — рядом с фотодетектором, что необходимо для проведения кросс-калибровки фотодиодов), а также система прецизионного позиционирования, которая позволяет с высокой точностью (10 мкм) направлять коллимированный световой поток в отдельные пиксели и их части. Интегрирующая сфера имеет внутренний диаметр 10.16 см (4 дюйма) и три выходных окна — для светодиода, фотодиода и коллиматора.

Проводятся измерения либо в режиме полной засветки (световой поток попадает на все пиксели одновременно), либо в режиме засветки одного пиксела (с коллиматором на интегрирующей сфере, диаметр выходного отверстия коллиматора — 0.1 мм). Первый тип измерений позволяет

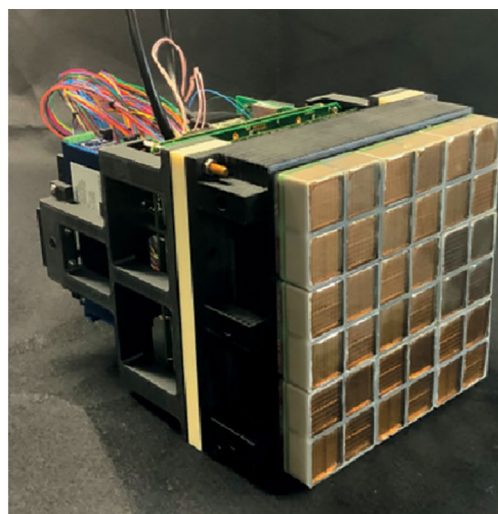
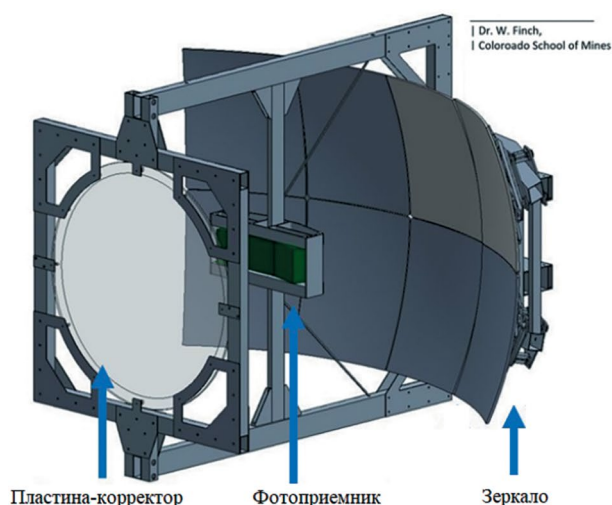


Рис. 1. Слева — схема флуоресцентного телескопа EUSO-SPB2, справа — фото модуля фотоприемника, состоящего из 36 МАФЭУ с общим числом каналов регистрации, равным 2304.

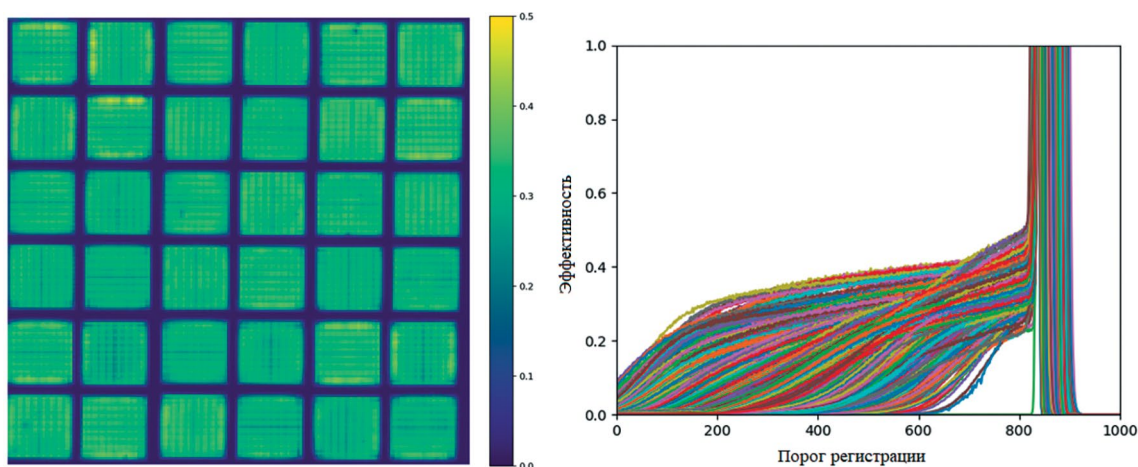


Рис. 2. Слева — результат сканирования матрицы модуля фотоприемника. Цветом отображены эффективности каждого пиксела. Темные области — границы между МАФЭУ. Разрешение сканирования — 200×200 точек на сторону фотоприемника (длина стороны 167 мм), длина волны светодиода — 375 нм. Справа — зависимость эффективности пиксела от порога дискриминатора (калибровочные кривые s-curve). Выставлены индивидуальные пороги, при которых эффективность детектирования при общем пороге 800 является максимальной.

определить эффективность всех пикселей одновременно и найти оптимальные значения порогов дискриминатора. Второй тип измерений используется для процедуры сканирования, которая позволяет определять фактические границы каждого пиксела и их внутреннюю структуру. Процедура сканирования выполняется в автоматическом режиме с помощью разработанной программы на ПК.

Примеры измерений показаны на рис. 2. В левой части рисунка — результаты абсолютной калибровки модуля фотоприемника EUSO-SPB2, полученные в режиме сканирования. Цветом отображены эффективности каждого пиксела (отношение числа зарегистрированных импульсов к числу фотонов на площадь пиксела в единицу времени). Хорошо видны как мертвые зоны между МАФЭУ, так и внутренняя неоднородная структура пикселей. Для некоторых краевых пикселей МАФЭУ наблюдаются значения выше квантовой эффективности фотокатода, что объясняется дополнительными шумовыми импульсами, возникающими при большой суммарной засветке фотосенсора. В правой части рисунка показаны зависимости числа фотоэлектронов (или эффективности детектирования) от порога дискриминатора DAC10 (так называемые кривые S-curve), снятые в режиме с индивидуальными порогами DAC7. Обращает на себя внимание существенный разброс полученных кривых по вертикальной шкале, что связано с индивидуальными характеристиками каналов регистрации, отличающихся даже в рамках одного МАФЭУ). С этим связана необходимость прецизионной попиксельной калибровки камеры. Индивидуальные пороги фотоприемника найдены для общего порога DAC10 = 800. Одновременное возникновение

пьедестала демонстрирует установку оптимальных индивидуальных порогов на данном фотоприемнике, при которых эффективность регистрации является максимальной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

EUSO-SPB2 планируется к запуску весной 2023 г., и полученные в ходе эксперимента данные помогут подтвердить и усовершенствовать методы детектирования ШАЛ. Эксперимент также является важным этапом в разработке орбитальных детекторов космических лучей предельно высоких энергий и нейтрино K-EUSO и РОЕММА. В ходе предполетной подготовки научной аппаратуры проекта разработана и применена методика калибровки многопиксельной камеры, работающей в режиме счета фотонов. Определены оптимальные пороги регистрации и эффективности всех 6912 каналов матрицы фотоприемника. Эти значения будут использованы как для более детального моделирования работы аппаратуры, так и при анализе данных (реконструкции параметров событий).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ricci M. for the JEM-EUSO collaboration // J. Phys. Conf. Ser. 2016. V. 718. Art. No. 052034.
2. Klimov P., Battisti M., Belov A. et al. // Universe. 2022. V. 8. Art. No. 88.
3. Гарипов Г.К., Зотов М.Ю., Климов П.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 3. С. 358; Garipov G.K., Zotov M.Yu., Klimov P.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. No. 3. P. 326.

4. *Olinto A.V., Krizmanic J., Adams J.H. et al. // JCAP. 2021. V. 2021. No. 06. Art. No. 007.*
5. *Eser J., Olinto A.V., Wiencke L. et al. // arXiv: 2112.08509. 2021.*
6. *Kungel V., Bachman R., Brewster J. et al. // PoS ICRC2021 (Berlin, 2021). Art. No. 412.*
7. *Osteria G., Adams J., Battisti M. et al. // PoS ICRC2021 (Berlin, 2021). Art. No. 206.*
8. *Filippatos G., Battisti M., Bertaina M. et al. // arXiv: 2112.07561. 2021.*
9. *Bagheri M., Bertone P., Fontane I. et al. // arXiv: 2109.01789. 2021.*

Ultra-high energy cosmic rays' fluorescent detector of the EUSO-SPB2 project

A. A. Belov^{1, 2}, P. A. Klimov¹, D. A. Trofimov^{1, 2, 3, *}
on behalf of the JEM-EUSO Collaboration

¹*Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, 119991 Russia*

²*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

³*Université Paris Cité, CNRS, Astroparticule et Cosmologie, Paris, 75013 France*

**e-mail: daniil@eas.sinp.msu.ru*

We presented a balloon experiment EUSO-SPB2 for the study of ultrahigh and extremely high energy cosmic rays. The main characteristics of the fluorescent and Cherenkov telescopes and their scientific tasks are given. As part of the pre-flight preparation, the calibration of a multi-channel photodetector was carried out.