

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДЕТЕКТОРА ПРОТОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

М. Е. Зелёный^{1,2,3}, Е. М. Стадничук^{1,2}, А. А. Нозик^{1,2}, И. В. Зимовец³,
А. Г. Кудинов¹, И. К. Резников¹

Представлен проект компактного космического детектора для измерения энергетических спектров протонов (10 – 100 МэВ) и электронов (до 10 МэВ) в солнечных космических лучах. Детектор может работать в двух режимах: дифференциальном (восстанавливается каждое событие) и интегральном (восстанавливается только энергетический спектр и состав излучения при большой загрузке).

Ключевые слова: детектор элементарных частиц, солнечные космические лучи, математическая статистика, анализ данных, компьютерное моделирование.

Введение. В результате спорадических явлений солнечной активности, таких как вспышки и корональные выбросы массы, электроны/ионы могут ускоряться до энергий в десятки МэВ/ГэВ соответственно, образуя так называемые солнечные космические лучи (СКЛ) [1]. Несмотря на многолетнее интенсивное исследование СКЛ, остается еще масса неразрешенных вопросов. До сих пор нет окончательного понимания механизмов ускорения частиц, их выхода из солнечной короны и распространения в межпланетной среде [1]. Детальное понимание этих механизмов является фундаментальной задачей, поскольку схожие физические процессы происходят во многих астрофизических объектах. Более того, это требуется для построения надежного количественного прогноза СКЛ в различных точках гелиосферы, поскольку СКЛ могут оказывать серьезное негативное воздействие как на околоземные космические системы и межпланетные станции,

¹ МФТИ (ГУ), 141701 Россия, Московская область, Долгопрудный, Институтский пер., 9; e-mail: mihail.zelenyy@phystech.edu.

² ИЯИ РАН, 117312 Россия, Москва, В-312, проспект 60-летия Октября, 7а.

³ ИКИ РАН, 117997 Россия, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32.

так и на биологические объекты на их борту [2]. Развитие космической техники и освоение космического пространства требует прогресса в изучении СКЛ и, в идеале, создания разветвленной сети мониторинговых космических станций. Для этого, в частности, необходимо создание надежных, легких, компактных, потребляющих малую мощность детекторов энергичных частиц, способных одновременно регистрировать электроны и ионы в диапазонах энергий 1–10 МэВ и 10–100 МэВ соответственно.

Описание детектора и методика измерения. В работе представлена концепция телескопа на основе сегментированного сцинтиляционного детектора. Методика измерения основана на анализе кривой зависимости ионизационных потерь (см. рис. 1(a)) от пробега частицы. По этой кривой можно с высокой точностью идентифицировать тип частицы и её кинетическую энергию, в том числе благодаря наличию у протонов характерной особенности – пика Брэгга в конце кривой [3].

Телескоп представляет собой набор цилиндрических сцинтиляционных шайб диаметром 2–5 см, разделенных светоотражающим материалом и помещенных в металлический корпус. В одном или нескольких местах в шайбе делается скос или “ушко” для установки фотоумножителя. Для обеспечения равномерного светосбора рассматриваются варианты с установкой до трех фотоумножителей на одну шайбу или с кольцевым оптоволоконном. Места установки детекторов в последовательных шайбах могут быть сдвинуты относительно друг друга на 60° для того, чтобы слои можно было делать достаточно тонкими и детекторы в соседних слоях не мешали друг другу. Входное окно телескопа остается открытым, но при необходимости на него может быть установлен коллиматор или фильтр низкоэнергетичных частиц (напр., бериллиевое покрытие мо-

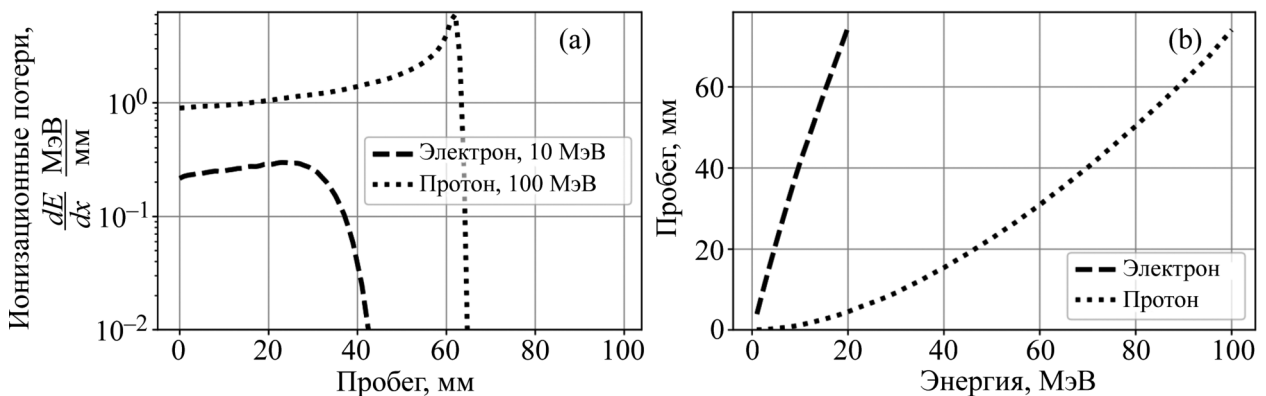


Рис. 1: (a) зависимость выделенной энергии от глубины для электрона и протона в антрацене; (b) полная длина пробега для протонов и электронов в антрацене.

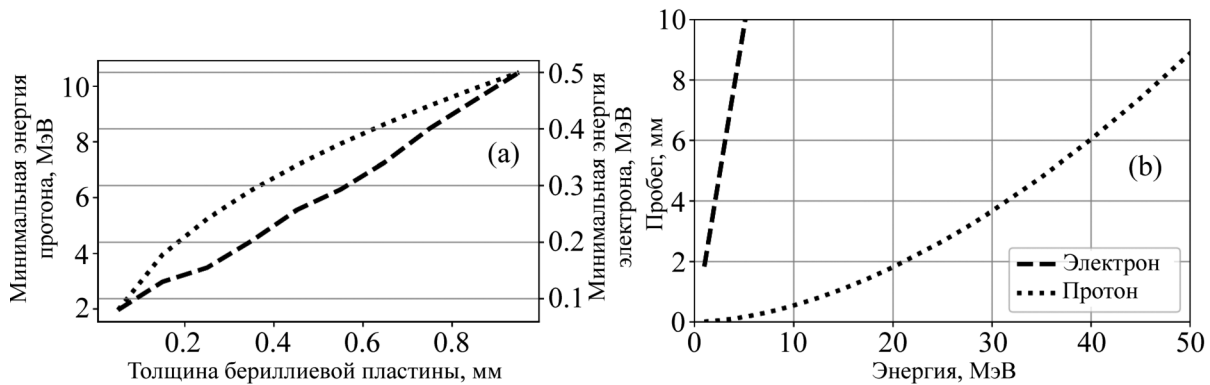


Рис. 2: (a) минимальная энергия частицы для преодоления бериллиевого фильтра; (b) полная длина пробега для протонов и электронов в D16.

жет отфильтровывать низкоэнергетичные протоны, при этом являясь прозрачным для электронов в интересующем нас диапазоне энергий, из рис. 2(а) следует, что оптимальным будет использовать напыление с толщиной 400–500 мкм). Толщина шайб может быть выбрана разной в зависимости от конкретных задач детектора (более тонкие слои позволяют получить лучшее разрешение, но при этом увеличивается вес детекторов и сопутствующей электроники). В общем случае предполагается, что вблизи входного окна плотность слоев выше, поскольку там требуется большая точность определения формы кривой потерь (для идентификации электронов). Минимальная толщина может составлять от 2 мм. Вдали от входного окна толщина увеличивается и достигает 5–10 мм. Полная толщина детектора может варьироваться в зависимости от необходимости снизить массу детектора или расширить диапазон регистрируемых энергий, так из рис. 1(б) следует, что для полного поглощения протонов с энергией 100 МэВ требуется 65 мм антрацена. Корпус прибора частично обеспечивает пассивную защиту от боковых частиц (см. рис. 2(б)), поглощая протоны с энергией 20–40 МэВ и электроны до 4 МэВ.

Моделирование и методика анализа. Из-за нестабильности величины потока солнечных частиц для детектора предусмотрены три режима работы. В первом режиме (при низкой скорости счета) производится анализ каждого события. Во втором режиме (при превышении некоторого порога, обусловленного скоростью работы электроники и временем высвечивания сцинтиллятора) идет накопление суммарного сигнала за некоторый промежуток времени, а затем восстанавливается энергетический спектр частиц, попавших в детектор за это время. Третий режим является смешанным: в шайбах, рас-

положенных вблизи входного окна, проводится измерение суммарных ионизационных потерь, а в дальних шайбах – идентификация отдельных событий. В качестве основы для анализа используются рассчитанные значения ионизационных потерь и набор триггеров для отсекаания событий. Для расчета энерговыделения в сцинтилляционных шайбах проведено Монте-Карло моделирование при помощи транспортного кода GEANT4 [4]. В качестве физической модели использовался модуль стандартных электромагнитных взаимодействий G4EmStandartPhysics, включающий в себя описание процессов, оказывающих основное влияние на распространение частиц в детекторе: ионизационные потери и их флуктуации, упругое кулоновское рассеяние и тормозное излучение электронов.

В одночастичном режиме для анализа отбираются события, вызванные частицами, прошедшими через входное окно, и, исходя из полной измеренной энергии и количества сработавших слоев, определяются диапазоны возможных параметров частицы, а также отсекаются события, пришедшие под большими углами. В данных диапазонах определяется набор параметров, максимизирующий значение функции правдоподобия – произведения вероятностей наблюдать измеренное энерговыделение при данном наборе параметров. Предварительный алгоритм позволяет определить энергию протонов с точностью 1 МэВ для исходной энергии 50 МэВ, то есть дает точность порядка 2%.

Для анализа спектра в интегральном режиме разрабатывается процедура, основанная на методике регуляризации обратных задач, разработанной В. Ф. Турчиным [5].

Предварительный (неоптимизированный) результат применения процедуры для восстановления данных, имитирующих лобовой пучок протонов в детекторе из 20 сегмен-

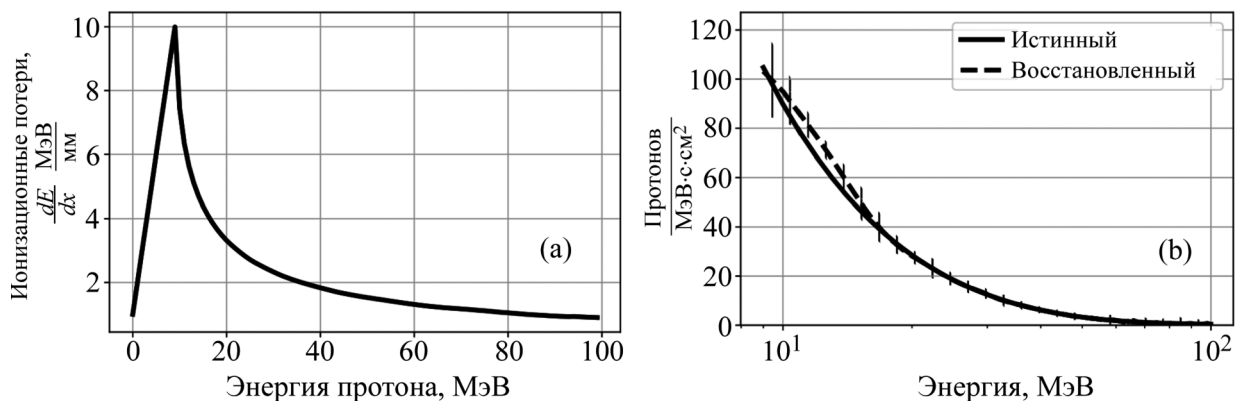


Рис. 3: (a) зависимость выделенной энергии от начальной энергии частицы в первом сегменте детектора; (b) результат восстановления дифференциального спектра.

тов (10 сегментов по 2 мм, 5 по 3 мм и 5 по 5 мм), приведен на рис. 3(b), пример референтной кривой поглощения в одном сегменте детектора, используемой для восстановления спектра, приведен на рис. 3(a).

Результаты. Разработана концепция секционного сцинтилляционного телескопа для регистрации высокоэнергетических электронов и протонов солнечного происхождения. Произведены работы по моделированию детектора и сделаны оценки его чувствительности для различных частиц и в различных диапазонах энергий. Предварительные результаты показывают, что при весе до 1 кг детектор сможет позволить измерение энергетического спектра протонов от 5 до 100 МэВ и электронов от 1 до 10 МэВ с точностью порядка 1–5%.

Существенным преимуществом детектора является возможность работы в так называемом интегральном режиме, когда не регистрируются индивидуальные частицы, а идет анализ полного энерговыделения вдоль оси детектора. Интегральный режим позволяет работать при скоростях счета более 1 МГц, обеспечивая при этом достаточно хорошую (около 5%) точность восстановления исходного спектра и состава излучения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-72-20134).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] L. Miroshnichenko, *Solar Cosmic Rays: Fundamentals and Applications* (Springer, 2015).
- [2] А. А. Петрукович, А. В. Дмитриев, В. М. Петров, *Плазменная гелиогеофизика*, Т. II (М., Физматлит, 2008).
- [3] С. Grupen and B. Shwartz, *Particle Detectors* (Cambridge University Press, 2008).
- [4] J. Allison et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **835**, 186 (2016).
- [5] M. Zelenyi, M. Poliakova, A. Nozik, and A. Khudyakov, in *Proceedings of the XXI International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists* (Dubna, Russia, 2017), <https://doi.org/10.1051/epjconf/201817707005>.

Поступила в редакцию 15 августа 2018 г.

После доработки 15 августа 2018 г.

Принята к публикации 14 декабря 2018 г.

Публикуется по результатам VII межинститутской молодежной конференции “Физика элементарных частиц и космология 2018” (ФИАН, Москва).