

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 539.1

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛЕГКИХ ЯДЕР В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ PAMELA ПО МНОГОКРАТНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ВДОЛЬ ТРЕКА

© 2021 г. В. В. Алексеев^{a, b, *}, О. А. Голуб^a, А. Г. Майоров^a

^aНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

^bЯрославский государственный университет им. П.Г. Демидова, Ярославль, 150003 Россия

*E-mail: v.alekseev1@uniyar.ac.ru

Поступила в редакцию 04.03.2021 г.

После доработки 11.05.2021 г.

Принята к публикации 12.05.2021 г.

В статье представлен метод идентификации легких ядер в космических лучах по данным измерений спектрометром PAMELA магнитной жесткости и потерь энергии частиц вдоль трека во время-пролетной и трековой системах. Проводится разделение ядер от водорода до бора включительно при помощи анализа распределений энергосбросов в плоскостях детекторов, обусловленных их флуктуациями. Также для каждого ядра на основе данных моделирования в Geant4 вычисляется оценка качества идентификации и вероятность ошибки (неверной идентификации).

Ключевые слова: эксперимент PAMELA, космические лучи, идентификация частиц, кремниевые детекторы

DOI: 10.56304/S2079562920060020

ВВЕДЕНИЕ

Космический эксперимент PAMELA проводился с июня 2006 года по январь 2016 года на околоземной орбите. Основная цель эксперимента – определение потока антипротонов в космических лучах, однако данные приборов позволяют измерять потоки частиц различного типа в диапазоне энергий ≈ 0.1 –1000 ГэВ [1].

Идентификация частиц в эксперименте PAMELA производится по данным нескольких приборов: основными являются магнитный спектрометр, позволяющий определить знак заряда и жесткость частицы, и калориметр с вольфрамовым поглотителем.

Для решения этой задачи предлагается алгоритм, позволяющий по набору энергосбросов частицы в плоскостях магнитного спектрометра и время-пролетной системы с высокой точностью определять тип ядра, попавшего в апертуру прибора.

Для предложенного алгоритма с использованием данных моделирования в Geant4 проведен анализ точности идентификации ядер.

ЭКСПЕРИМЕНТ PAMELA

Прибор PAMELA состоит из нескольких детекторных систем; в контексте задачи нас будут интересовать следующие (см. рис. 1):

1. Трековая система в магнитном поле (трекер). Задачей трекера [2] является восстановление траектории частицы, по кривизне которой определяется жесткость (отношение импульса частицы к заряду) и знак заряда. Трековая система состоит из шести пар плоских кремниевых детекторов, в которых измеряются координаты прохождения частицы и ее ионизационные потери.

2. Время-пролетная система (ВПС). Ее задачей является измерение времени пролета частицы через спектрометр с целью определения ее скорости, измерения ионизационных потерь и подавление фоновых и альбедных частиц [1]. Нас будут интересовать измерения ионизационных потерь в плоскостях, расположенных до калориметра (C1, C2 и C3).

3. Электромагнитный калориметр — прибор, предназначенный для электрон-адронного разделения и измерения энергии взаимодействующих в нем частиц.

Задача заключается в том, чтобы по набору энергосбросов в плоскостях трекера (12 значений) и во время-пролетной системе (6 значений)

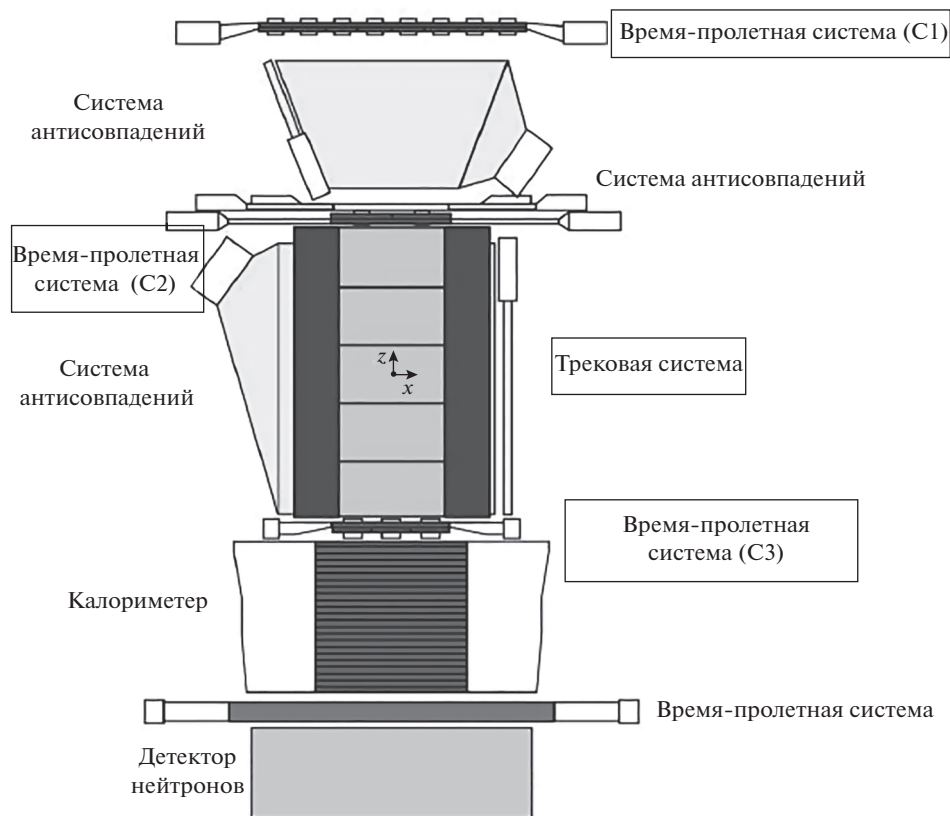


Рис. 1. Схема прибора PAMELA. Рамкой обведены детекторные системы, использованные в данном исследовании: трековая система (Spectrometer) и время-пролетная система (Time-of-Flight System, пары плоскостей C1, C2 и C3).

с высокой точностью определить тип частицы, попавшей в прибор.

частицы, для которых невозможно точно измерить магнитную жесткость.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ОТБОР СОБЫТИЙ

Моделирование событий производится методом Монте-Карло при помощи ПО на основе Geant4. Изначально формируются достаточно большие выборки (порядка 1–2 млн) событий пролета для каждого из исследуемых ядер. Затем, к выборкам применяются базовые критерии отбора:

1. В трековой системе идентифицирован ровно один трек (это соответствует прохождению одной частицы).
2. Определены координаты хотя бы 4 точек взаимодействия в проекции X и хотя бы 3 точек в проекции Y плоскостей трека (это позволяет восстановить траекторию и вычислить жесткость частицы).
3. Нет срабатываний в системе анτισовпадений
4. Нет сигнала одновременно в нескольких счетчиках одной плоскости время-пролетной системы.

Данные критерии позволяют отсеять из выборки вторичные частицы (образовавшиеся в результате взаимодействия с частями прибора), а также

АЛГОРИТМ КЛАССИФИКАЦИИ СОБЫТИЙ

Для каждого зарегистрированного события имеется 18 численных значений энергосвечения: 12 в плоскостях трека и 6 во время-пролетной системе. Однако этих значений может быть меньше из-за эффективности работы прибора (для восстановления трека необходимы только 7 взаимодействий с плоскостями трека). Задача состоит в том, чтобы по этому набору значений классифицировать частицу как ядро с некоторым зарядом (либо никак не классифицировать). При построении алгоритма классификации желательно минимизировать (а) долю отсеянных (никак не классифицированных) событий, (б) вероятность ошибочной идентификации.

Алгоритм основан на анализе зависимости энергосвечения частицы в зависимости от ее жесткости и заряда. На первом этапе построения алгоритма строится зависимость энергосвечения от жесткости для смоделированной выборки каждой из исследуемых частиц (ядра с атомными массами 1–5; более тяжелые ядра не были включены в ана-

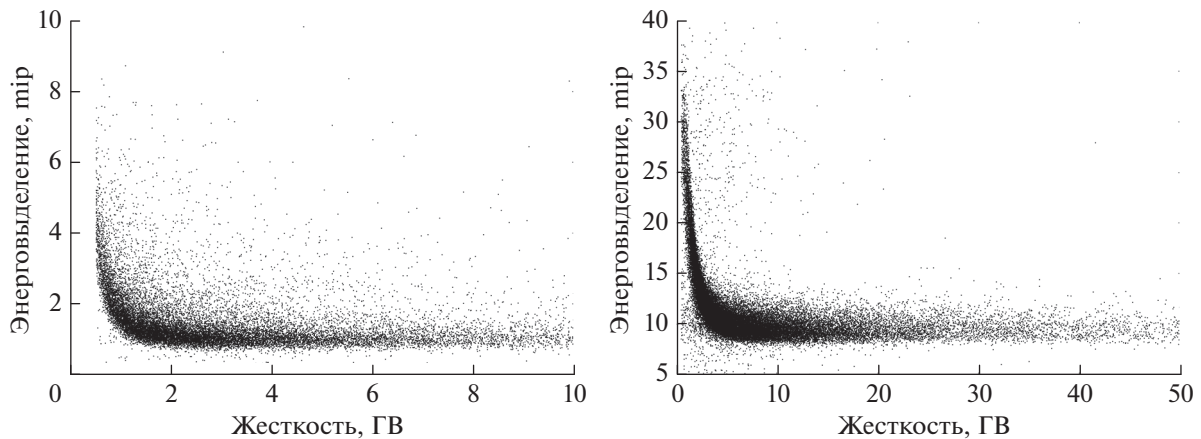


Рис. 2. Зависимость энерговыделения от жесткости: левая панель — протоны в плоскости трековой системы, правая панель — ядра лития в плоскости ВПС.

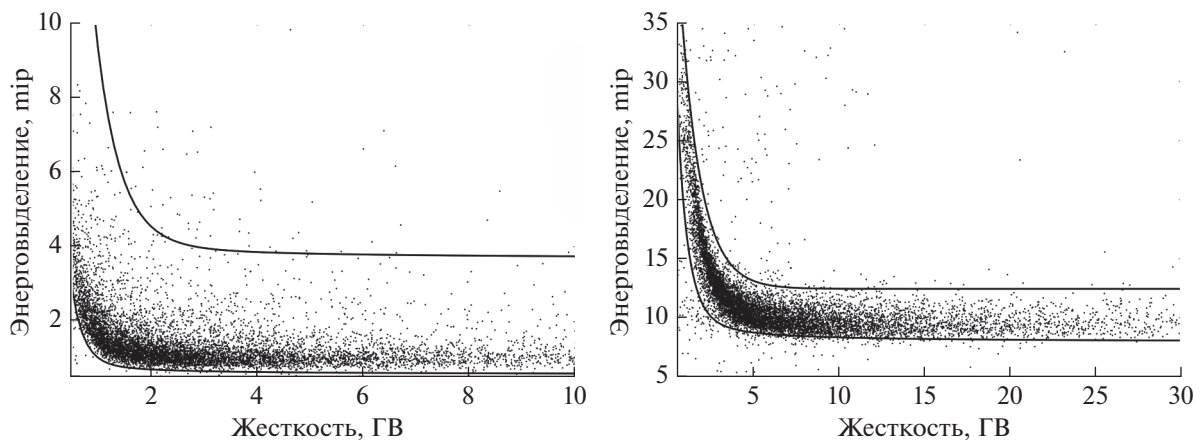


Рис. 3. Отделяющие кривые для распределений энерговыделения от жесткости: левая панель — для протонов в плоскости трековой системы, правая панель — для ядер лития в плоскости ВПС.

лиз по причине некорректного измерения приборами высоких значений энерговыделений). Примеры распределений показаны на рис. 2.

Для каждого типа ядра $Z = 1-5$ (Z — заряд ядра) и для каждого из приборов по приведенным распределениям строятся отделяющие кривые $y_{\text{bottom}}(R)$ и $y_{\text{top}}(R)$, где R — жесткость частицы. К таким кривым предъявляются следующие требования:

- между кривыми должны попадать не менее 95% событий для данного типа ядра,
- кривые должны иметь простое аналитическое описание с возможно меньшим набором параметров (для сходимости алгоритмов приближения).

В работе все отделяющие кривые имеют вид

$$y = a \exp(bx) + \frac{c}{x} + d,$$

где a, b, c, d — вещественные параметры, описывающие форму кривой. Параметр d отвечает за асимптотический вид данной кривой при $x \rightarrow +\infty$, поскольку $\lim_{x \rightarrow +\infty} y(x) = d$ при $b < 0$.

Построение кривых производится на основе вычисления квантилей выборки энерговыделений для узких диапазонов жесткостей (нижний — 1%, верхний — 98%). По полученным точкам в координатах “жесткость—энерговыделение” методом наименьших квадратов (численно) находится отделяющая кривая. Примеры отделяющих кривых приведены на рис. 3. В табл. 1 и 2 представлены значения параметров кривых для всех ядер отдельно для трековой и время-пролетной систем.

Будем говорить, что событие идентифицировано некоторой плоскостью трекера или ВПС как ядро типа Z , если значение энерговыделения в данной плоскости попало в диапазон, задаваемый со-

Таблица 1. Параметры отделяющих кривых для плоскостей трекера

	Нижняя кривая				Верхняя кривая			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
H	19.29	−4.67	0.27	0.57	47.2	−2.26	0.72	3.67
He	47.2	−2.26	0.72	3.67	53.31	−1.57	1.51	9.43
Li	40.71	−1.58	3.50	9.14	41.15	−0.87	1.74	17.93
Be	101.37	−3.03	3.16	15.14	34.29	−0.97	5.05	27.09
B	45.11	−1.7	3.19	18.01	45.28	−1.18	3.11	34.44

Таблица 2. Параметры отделяющих кривых для плоскостей ВПС

	Нижняя кривая				Верхняя кривая			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
H	5.75	−2.9	0.2	0.7	12.2	−1.67	2.53	2.3
He	12.2	−1.67	2.53	2.3	27.67	−1.59	3.97	7.91
Li	27.67	−1.59	3.97	7.91	43.83	−0.84	0.0	12.42
Be	38.17	−1.36	4.50	11.83	37.17	−0.59	0.0	20.12
B	20.38	−1.0	8.15	16.52	26.12	−0.7	3.76	28.74

ответствующими отделяющими кривыми. Важно: идентификация по одной плоскости может быть неоднозначной, т.к. диапазоны энергосигналов ядер с соседними номерами пересекаются.

Событие будем идентифицировать как ядро типа *Z*, если

1. оно идентифицировано как ядро типа *Z* хотя бы в 8 плоскостях трекера и хотя бы в 4 плоскостях ВПС;

2. критерий из пункта 1 выполнен только для одного типа ядер.

Если критерий идентификации не выполнен ни для одного типа ядер, частицу будем считать не идентифицированной.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА АЛГОРИТМА КЛАССИФИКАЦИИ

Простейшая оценка качества работы алгоритма обеспечивается матрицей *априорных* вероятностей ошибок

$$M_{ij} = P(\text{measured } j | \text{real } i),$$

где $P(\text{measured } j | \text{real } i)$ – вероятность идентификации частицы типа *i* как частица типа *j*. На диагонали матрицы стоят вероятности верной идентификации частицы, величина $\left(1 - \sum_j M_{ij}\right)$ отражает вероятность не идентифицировать событие. Матрица ошибок *M* приведена в табл. 3.

Однако, эта матрица ошибок не учитывает соотношение потоков ядер в космических лучах. Чтобы учесть это соотношение, построим матрицу *апостериорных* вероятностей ошибок

$$Q_{ij} = P(\text{measured } i | \text{real } j) = \frac{P(\text{real } j) M_{ij}}{\sum_k P(\text{real } k) M_{ik}}.$$

Здесь $P(\text{real } j)$ – вероятность [3] обнаружить частицу типа *j*, условная вероятность выражена через элементы матрицы *M* по формуле Байеса [4]. Здесь суммы элементов матрицы по строкам рав-

Таблица 3. Матрица априорных вероятностей ошибок *M*

	H	He	Li	Be	B	н/и
H	0.961	0.000	0.000	0.000	0.000	0.039
He	0.011	0.929	0.000	0.000	0.000	0.060
Li	0.003	0.013	0.819	0.004	0.000	0.161
Be	0.002	0.006	0.007	0.701	0.005	0.279
B	<0.001	0.003	<0.001	0.020	0.764	0.211

Таблица 4. Матрица апостериорных вероятностей ошибок Q

	H	He	Li	Be	B
H	0.999	<0.001	0.000	0.000	0.000
He	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000
Li	0.000	0.008	0.986	0.004	0.002
Be	0.000	0.002	0.010	0.923	0.065
B	0.000	0.000	0.000	0.003	0.997

ны 1, т.к. учитываются только идентифицированные события. Интересующие вероятности расположены на диагонали: элемент Q_{ii} показывает вероятность того, что частица, идентифицированная как ядро типа i , идентифицирована верно. Матрица ошибок Q приведена в табл. 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Предложенный алгоритм позволяет по набору энергосигналов в кремниевых детекторах трековой и время-пролетной системы прибора PAMELA с высокой точностью идентифицировать легкие ядра с зарядами $Z = 1-5$: практически со стопроцентной точностью идентифицируются протоны и ядра гелия, доля не идентифицированных событий составляет менее 30% для ядер бериллия, для остальных ядер она меньше. Наибольшая ошибка алгоритма возникает при разделении ядер бора и бериллия: это связано с тем, что распределения энергосигналов для этих ядер сильно перекрываются: с ненулевой вероятностью ядро бериллия может дать набор энергосигналов, характерный для бора, и наоборот.

В будущем планируется проанализировать работу алгоритма в более узких диапазонах по жесткости и при другом соотношении элементов в космических лучах.

Предложенный метод не использует конструктивные особенности конкретного прибора, поэтому его можно применять для анализа сходных данных, полученных на других детекторах частиц.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-02-00951.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Picozza P., Galper A.M., Castellini G. et al. // *Astropart. Phys.* 2007. V. 27 P. 296–315.
2. Straulino S., Adriani O., Bonechi L. et al. // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A.* 2006. V. 556. P. 100–114.
3. Aguilar M., Cavasonza L.A., Ambrosi G. et al. // *Phys. Rep.* 2021. V. 894. P. 1.
4. Боровков А.А. Теория вероятностей. [Probability Theory]. 1986. Москва: Наука.

Light Nuclei Identification in Cosmic Rays in the Pamela Experiment by Multiple Measurements of Energy Loss Along the Particle Track

V. V. Alekseev^{1, 2, *}, O. A. Golub¹, and A. G. Mayorov¹

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

²Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, 150003 Russia

*e-mail: v.alekseev1@uniyar.ac.ru

Received March 4, 2021; revised May 11, 2021; accepted May 12, 2021

The article presents a method for identifying light nuclei in cosmic rays from PAMELA spectrometer measurements of magnetic rigidity and energy losses of particles along the track in the time-of-flight and tracking systems. Nuclei from hydrogen to boron inclusive are separated by analyzing energy loss distributions in detector planes caused by their fluctuations. The identification quality estimate and the error (misidentification) probability are also calculated for each nucleus on the basis of Geant4 simulation data.

Keywords: PAMELA experiment, cosmic rays, particle identification, silicon detectors