

УДК 524.1

МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ АНТИПРОТОНОВ НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ ПРИ ПОМОЩИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЗИЦИОННО- ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО КАЛОРИМЕТРА СПЕКТРОМЕТРА ПАМЕЛА

С. А. Роденко, А. Г. Майоров

С июня 2006 г. по февраль 2016 г. на борту космического аппарата Ресурс-ДК1 проводился научный эксперимент ПАМЕЛА по изучению космических лучей в широком диапазоне энергий. Важную роль для этой области физики представляют данные о потоках антипротонов в околоземном космическом пространстве. Их регистрация спектрометром ПАМЕЛА возможна при помощи двух независимых детекторов: трековой системы в магнитном поле и позиционно-чувствительного калориметра (в области низких энергий, < 1 ГэВ). Представленная методика идентификации антипротонов основана на анализе треков антипротона и вторичных заряженных мезонов, возникающих в процессе его аннигиляции в калориметре. Используя методику, можно идентифицировать антипротоны с энергиями 200–800 МэВ, независимо подтвердив данные магнитного анализа и увеличив статистику за счет большего геометрического фактора калориметра в сравнении с трековой системой.

Ключевые слова: антипротон, аннигиляция, электромагнитный калориметр.

Антипротоны – частицы антиматерии, присутствие которых в галактических космических лучах сегодня достоверно подтверждено. Считается, что основным механизмом их генерации в Галактике являются взаимодействия высокоэнергичных космических

Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31; e-mail: fenkor@yandex.ru.

лучей с межзвездным веществом, т.н. механизм вторичного рождения [1, 2]. Однако существующие экспериментальные данные в диапазоне энергий от нескольких ГэВ и до 100 ГэВ недостаточно хорошо описываются в рамках данной концепции [3–5]. Это происходит из-за недостатка знаний о механизмах генерации и распространения космических лучей в Галактике и гелиосфере.

Магнитный спектрометр ПАМЕЛА [6] состоит из набора детекторных систем, позволяющих определить скорость, импульс, заряд, энергию, направление прилета и тип зарегистрированной частицы. Идентификация антипротонов в эксперименте ПАМЕЛА возможна двумя независимыми способами: 1) используя отклонение в магнитной трековой системе и время пролета через прибор; 2) анализируя топологию аннигиляции в стриповом позиционно-чувствительном калориметре. В работе рассматривается способ под номером 2.

Электромагнитный калориметр состоит из 44 односторонних кремниевых позиционно-чувствительных плоскостей, чередующихся с 22 пластинами вольфрамового поглотителя. Каждая плоскость содержит 96 стрипов, причем стрипы в соседних плоскостях расположены ортогонально. Это обеспечивает получение двумерной пространственной информации о взаимодействии частиц в калориметре. Подробнее о калориметре спектрометра ПАМЕЛА можно прочитать в работе [6]. Такое устройство позволяет идентифицировать остановившиеся антипротоны, которые аннигилируют в веществе калориметра с образованием вторичных частиц (π -мезонов). Треки разлетающихся частиц имеют характерную форму “звезда” (рис. 1), а также меньшее энерговыделение, чем трек влетевшего антипротона.

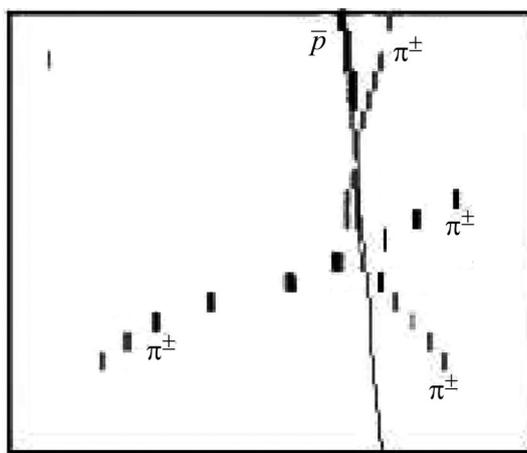


Рис. 1: Аннигиляция антипротона в калориметре.

Разработан следующий поэтапный алгоритм идентификации антипротонов:

I. Поиск точки влета частицы в калориметр и определение энерговыделения в этой точке.

II. Поиск точки аннигиляции и определение энерговыделения в этой точке.

III. Анализ распределения событий по величине полного энерговыделения в калориметре.

IV. Анализ топологии аннигиляции (анализ треков вторичных частиц).

Метод не лишен недостатков, главным из которых является появление “ложных” событий (фона), вызванных случайно похожими на “звезду” взаимодействиями других частиц в калориметре. Основным фоном являются протоны (доминирующая компонента космических лучей), которые, взаимодействуя в калориметре, могут рождать вторичные частицы и ядра отдачи, образуя топологии, похожие на аннигиляцию антипротонов. Также фоном являются π -мезоны – нестабильные частицы, которые рождаются при взаимодействии первичных протонов с крышкой контейнера или спутником и попадают в апертуру прибора.

Для создания методики идентификации промоделированы антипротоны с жесткостью 0.75 ГВ, моноэнергетические протоны в диапазоне жесткостей 0.75–15 ГВ, моноэнергетические π -мезоны в диапазоне жесткостей 0.75–15 ГВ. Последовательно применим каждый шаг алгоритма к указанным выше частицам.

I. Поиск точки влета частицы в калориметр. Для простоты будем считать, что сигнал в первой плоскости присутствует всегда. Ищутся сработавшие стрипы, выбираются те события, где сработало не более 2-х стрипов или 2-х групп из двух соседних сработавших стрипов. Из двух сработавших стрипов (групп стрипов) выбирается стрип с максимальным энерговыделением – этот стрип и является координатой точки влета.

Построены распределения событий по величине энерговыделения в точке влета для антипротонов с жесткостью 0.75 ГВ и протонов с жесткостью 1 и 2.5 ГВ (рис. 2).

Далее отбираются события с энерговыделением больше 1.5 mip^1 . Этот критерий эффективно отбрасывает протоны высокой энергии, которые, в отличие от низкоэнергичных антипротонов, имеют малые ионизационные потери в первой плоскости калориметра.

II. Поиск точки аннигиляции. В плоскостях с 5 по 17, что соответствует середине калориметра, выбираются первые несколько точек с максимальным энерговыделением.

¹mip – minimum ionizing particle (одиночная релятивистская частица). Энерговыделение для одиночной релятивистской частицы принято за единицу измерения энерговыделения.

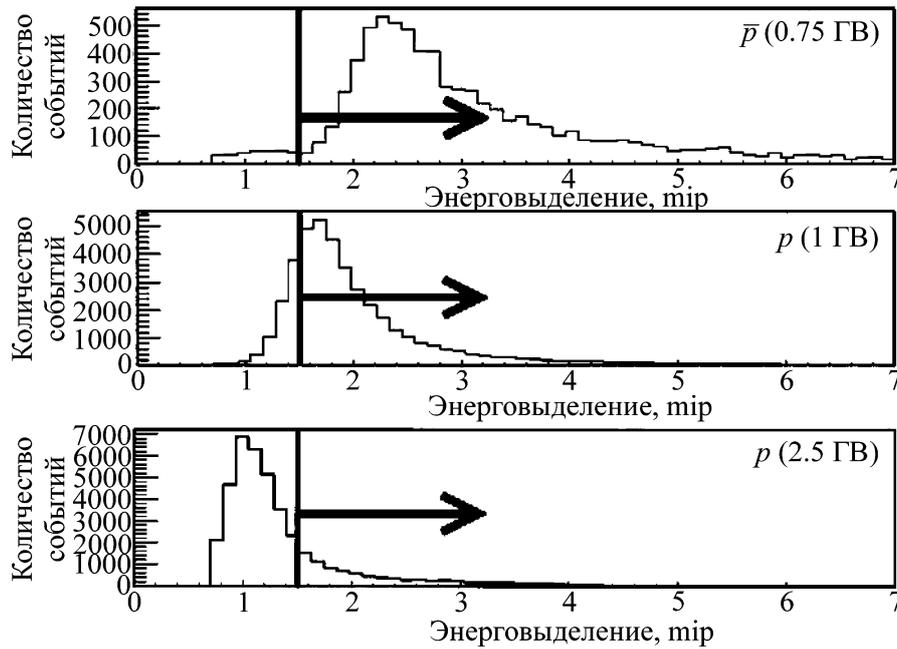


Рис. 2: Распределения событий по энерговыделению в точке влета.

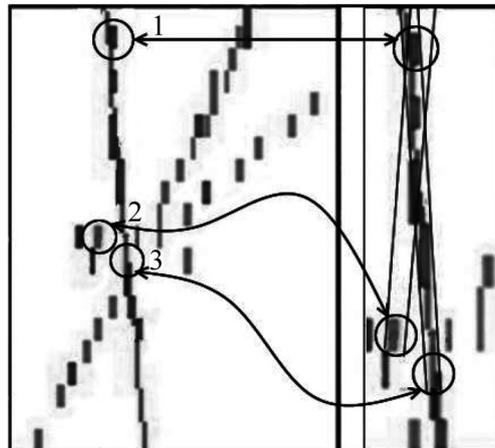


Рис. 3: Поиск точки аннигиляции (1 – точка влета, 2 и 3 – точки с максимальным энерговыделением, 3 – точка аннигиляции).

Каждая из них соединяется с точкой влета прямой и вычисляется энерговыделение в цилиндре вокруг этой прямой ± 1 стрип. Цилиндру с максимальным энерговыделением будет принадлежать точка аннигиляции (рис. 3).

Построены распределения по величине энерговыделения в точке аннигиляции для антипротонов с жесткостью 0.75 ГВ и протонов с жесткостью 1 и 2.5 ГВ (рис. 4).

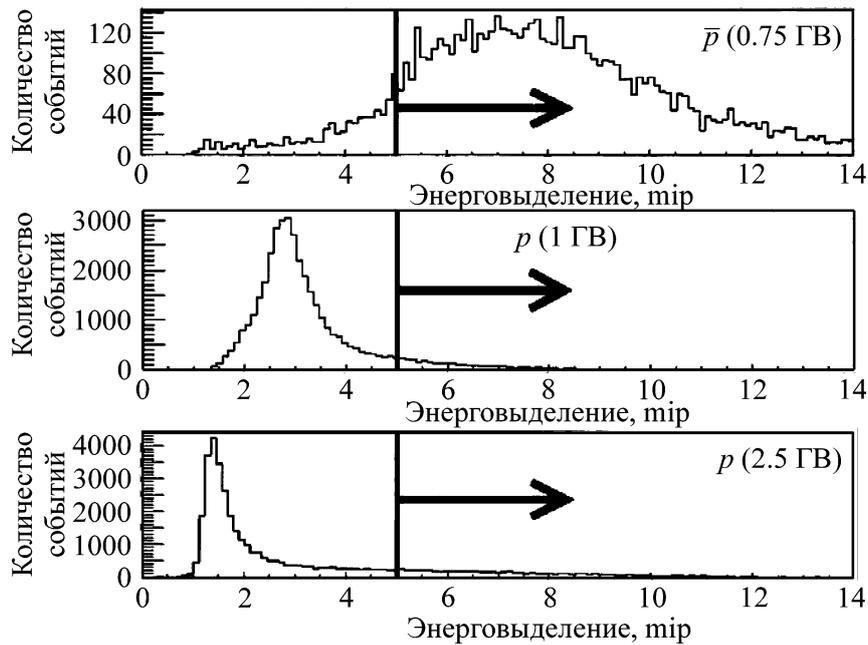


Рис. 4: Распределения событий по энерговыведению в “точке аннигиляции”.

Для дальнейшего анализа отбираются события с энерговыведением больше 5 мip. Критерий оказывается эффективным и хорошо исключает из анализа протоны любых энергий, в том числе с жесткостью ниже 1 ГВ. Это объясняется тем, что протоны не дают дополнительного энерговыведения, связанного с аннигиляцией в точке остановки.

III. Анализ распределения событий по величине полного энерговыведения в калориметре. Вторичные частицы, образующиеся в результате аннигиляции антипротона, также дают энерговыведение в калориметре. Это обстоятельство тоже учтено в алгоритме.

На рис. 5 показано распределение событий по величине суммарного энерговыведения в калориметре для антипротонов с жесткостью 0.75 ГВ и протонов с жесткостью 2.5 ГВ. Хвост протонного распределения в области высоких энерговыведений не велик и обусловлен ядерными взаимодействиями. Пик (суммарных) потерь энергии в калориметре для антипротонов находится в диапазоне 200–600 мip, а для протонов – ниже 200 мip. Для анализа отбираются события с суммарным энерговыведением в калориметре больше 200 мip. Отметим, что с ростом энергии протонов ядерные взаимодействия становятся более интенсивными и протоны лучше имитируют антипротоны. Однако протоны высоких энергий исключаются из анализа предыдущими критериями.

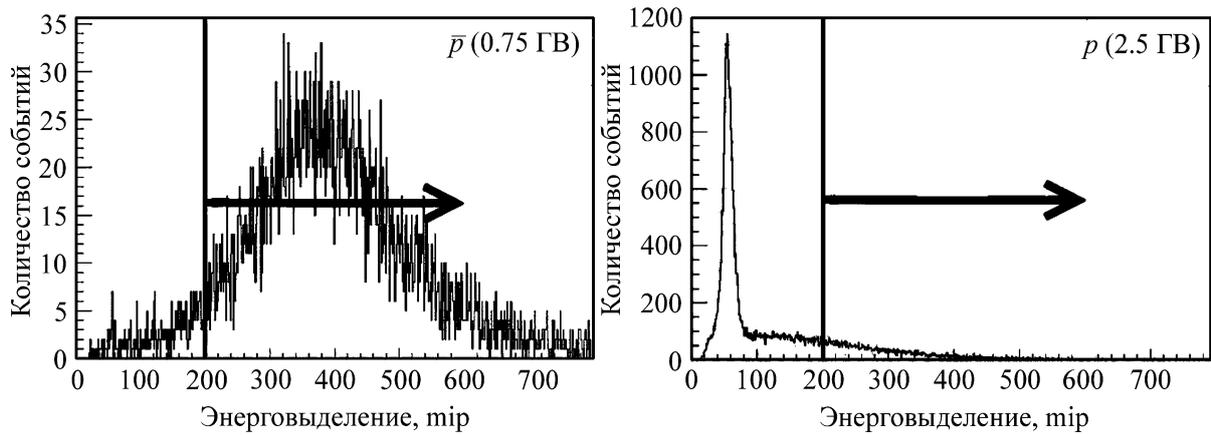


Рис. 5: Распределение событий по величине полного энерговыделения в калориметре.

IV. Анализ топологии аннигиляции (анализ треков вторичных частиц). При аннигиляции антипротона в веществе калориметра образуются π -мезоны, разлетающиеся под определенными углами согласно закону сохранения импульса. Для того чтобы идентифицировать антипротоны, ищутся выделенные направления π -мезонов.

Для антипротонов 0.75 ГВ и для протонов с различной жесткостью проанализирована зависимость числа вторичных частиц от их средних углов разлета из точки аннигиляции. Наибольшее количество антипротонов приходится на область, в которой средний угол разлета вторичных частиц меньше 40 градусов, а число пиков от 4 до 8, тогда как протоны сосредоточены в области, где средний угол разлета вторичных частиц больше 50 градусов, а число пиков меньше четырех.

В результате применения разработанного алгоритма к данным моделирования были получены величины эффективности отбора² антипротонов и режекции³ протонов и π -мезонов (табл. 1). Анализ проводился только с использованием калориметра.

Ожидаемое соотношение потоков протонов и антипротонов в космических лучах при энергиях ~ 100 МэВ $1 : 10^{-5}$ [6], поэтому, для надежного исключения протонов из анализа, уровень их режекции должен быть $< 10^{-5}$.

²Эффективность отбора равна количеству отобранных событий, деленному на количество промоделированных событий.

³Режекция равна количеству отобранных событий, деленному на количество промоделированных событий.

Т а б л и ц а 1

Эффективность отбора и фон

Частица	Жесткость, ГВ	Эффективность /режекция	Частица	Жесткость, ГВ	Эффективность /режекция
Антипротон	0.75	0.1 ($\sim 25 \text{ см}^2 \cdot \text{ср}$)	Протон	2.5	$1.5 \cdot 10^{-4}$
Протон	0.75	$< 6.5 \cdot 10^{-5}$		3	$5.6 \cdot 10^{-4}$
	1	$< 6.4 \cdot 10^{-5}$		4	$9.7 \cdot 10^{-4}$
	1.25	$< 6.5 \cdot 10^{-5}$		5	$1.3 \cdot 10^{-3}$
	1.75	$< 1.1 \cdot 10^{-4}$		π -мезон	1
	2	$2.0 \cdot 10^{-4}$	1.25		$1.5 \cdot 10^{-4}$

Фактор режекции с ростом энергии уменьшается, а имитация антипротонов протонами и π -мезонами растет; примесь фона в антипротонах растет с ростом энергии. Был построен график зависимости режекции протонов от жесткости (серые точки на рис. 6). На графике черной пунктирной линией построен спектр галактических космических лучей в безразмерных единицах (площадь под графиком равна 1). Белыми точками показана “режекция” протонов, полученная умножением отнормированного спектра ГКЛ на значения режекции протонов для определенной жесткости.

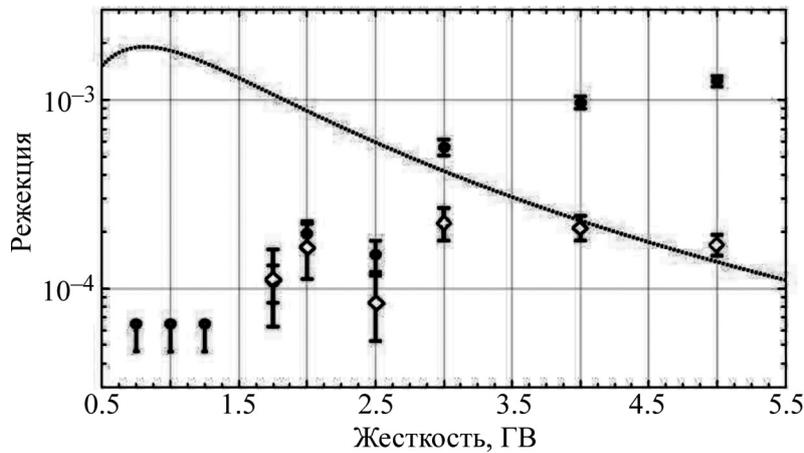


Рис. 6: Зависимость режекции протонов от жесткости.

Полученная режекция в области энергий свыше нескольких ГэВ недостаточна и выходит за пределы требуемого значения, поэтому предложенный метод пока нельзя применять к экспериментальным данным. Однако отметим, что π -мезоны и протоны с низкими энергиями уже сейчас хорошо исключаются из анализа.

Планируется усовершенствовать метод для лучшего исключения протонов высоких энергий. Если не получится этого сделать при помощи только калориметра, то в анализ будет включена время-пролетная система, измеряющая скорости частиц. Это приведет к уменьшению светосилы отбора, но повышению достоверности результатов.

Работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 14-12-00373) и при поддержке гранта Президента РФ (грант МК-6271.2015.2).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] I. V. Moskalenko and A. W. Strong, *Astrophys. Journ.* **493**, 694 (1998).
- [2] S. A. Stephens, *Astrophys. and Space Sci.* **76**(1), 87 (1981).
- [3] M. Boezio, V. Bonvicini, P. Schiavon, et al., *Astrophys. Journ.* **561**, 787 (2001).
- [4] Y. Asaoka, Y. Shikaze, K. Abe, et al., *Phys. Rev. Lett.* **88**(5), 051101(1-4) (2002).
- [5] K. Abe, H. Fuke, S. Haino, et al., Measurement of cosmic-ray low-energy antiproton spectrum with the first Bess-Polar Antarctic flight. // arXiv:nucl-ex/0805.1754v2.21 Sep 2008.
- [6] P. Picozza, A. M. Galper, G. Castellini, et al., *Astroparticle Physics*, **27**, 296 (2007).

По материалам V Международной молодежной научной школы-конференции “Современные проблемы физики и технологий”.

Поступила в редакцию 12 июля 2016 г.