

Измерение потока антипротонов первичного космического излучения в диапазоне энергий от 60 МэВ до 350 ГэВ в эксперименте ПАМЕЛА

О. Адриани^{a,b}, Г. А. Базилевская^c, Дж. С. Барбарино^{d,e}, Р. Белотти^{f,g}, М. Боецио^h, Э. А. Богомоловⁱ, В. Бонвичини^h, М. Бонджи^b, Л. Бонеки^{a,b}, С. В. Борисов^{j,k,l}, С. Боттай^b, А. Бруно^{f,g}, А. Вакки^h, Е. Вануччини^b, Г. И. Васильевⁱ, С. А. Воронов^l, Ю. Ву^m, А. М. Гальпер^l, Л. А. Гришанцева^l, И. А. Данильченко^l, В. Джиллард^m, Дж. Джерси^{h,o}, Дж. Зампа^h, Н. Зампа^h, В. Г. Зверев^l, М. Казолино^{j,r}, Д. Кампана^e, Р. Карбоне^{e,k}, А. В. Карелин^l, П. Карлсон^m, Дж. Кастеллиниⁿ, Ф. Кафанья^g, А. Н. Квашнин^c, С. В. Колдашов^l, С. А. Колдобский^l, С. Ю. Крутьковⁱ, Л. Консиглио^e, А. А. Леонов^l, А. Г. Майоров^{1)l}, В. В. Малахов^l, В. Мальвезци^j, Л. Марчелли^j, В. Менн^p, В. В. Михайлов^l, Э. Мокьютти^h, А. Монако^{f,g}, Н. Мори^{a,b}, Н. Н. Никонов^{i,j,k}, Дж. Остерия^e, Ф. Пальма^{i,j}, П. Папини^b, С. Пизолотто^h, М. П. Де Паскале^{j,k}, П. Пикоцца^{j,k}, М. Пирс^m, М. Риччи^q, С. Риччиарини^b, Л. Розетто^m, М. Ф. Рунцо^l, К. Де Сантис^j, Р. Саркар^h, М. Симон^q, Н. Де Симоне^{j,k}, Р. Спарволи^{j,k}, П. Спилантини^{a,b}, Ю. И. Стожков^c, В. Ди Феличе^{j,k}, Ю. Т. Юркин^l

^a University of Florence, Department of Physics, I-50019 Sesto Fiorentino, Florence, Italy

^b INFN, Sezione di Florence, I-50019 Sesto Fiorentino, Florence, Italy

^c Физический институт им. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

^d University of Naples "Federico II", Department of Physics, I-80126 Naples, Italy

^e INFN, Sezione di Naples, I-80126 Naples, Italy

^f University of Bari, Department of Physics, I-70126 Bari, Italy

^g INFN, Sezione di Bari, I-70126 Bari, Italy

^h INFN, Sezione di Trieste, I-34149 Trieste, Italy

ⁱ Физико-технический институт им. Иоффе РАН, 194021 С.-Петербург, Россия

^j INFN, Sezione di Rome Tor Vergata, I-00133 Rome, Italy

^k University of Rome Tor Vergata, Department of Physics, I-00133 Rome, Italy

^l Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 115409, Москва, Россия

^m KTH, Department of Physics, and the Oskar Klein Centre for Cosmoparticle Physics, AlbaNova University Centre, SE-10691 Stockholm, Sweden

ⁿ IFAC, I-50019 Sesto Fiorentino, Florence, Italy

^o University of Trieste, Department of Physics, I-34147 Trieste, Italy

^p Universitat Siegen, Department of Physics, D-57068 Siegen, Germany

^q INFN, Laboratori Nazionali di Frascati, Via Enrico Fermi 40, I-00044 Frascati, Italy

^r RIKEN, Advanced Science Institute, Wako-shi, Japan

Поступила в редакцию 11 октября 2012 г.

Измерение галактической компоненты антипротонов в космическом излучении представляет интерес в плане изучения механизмов генерации и распространения частиц и античастиц в Галактике, а также поиска новых источников, например аннигиляции или распада гипотетических частиц "темной" материи. В работе приводятся спектр антипротонов и отношение потоков антипротонов и протонов первичного космического излучения в диапазоне энергий от 60 МэВ до 350 ГэВ, найденные в эксперименте ПАМЕЛА при обработке информации, полученной с июня 2006 г. по январь 2010 г. Использование усовершенствованного метода обработки данных, основанного на математической модели их классификации, позволило увеличить статистику и продвинуться в область более высоких энергий, чем в более ранних работах.

Впервые антипротоны в космических лучах были обнаружены в семидесятых годах прошлого столетия [1, 2]. Основная причина, по которой их регистрация

казалась важной, заключалась в изучении проблемы наблюдаемой барионной асимметрии Вселенной.

Однако последующие измерения и развитие моделей генерации и распространения античастиц в Галактике привели к выводу о том, что космические ан-

¹⁾ e-mail: mayorov.andr@gmail.com

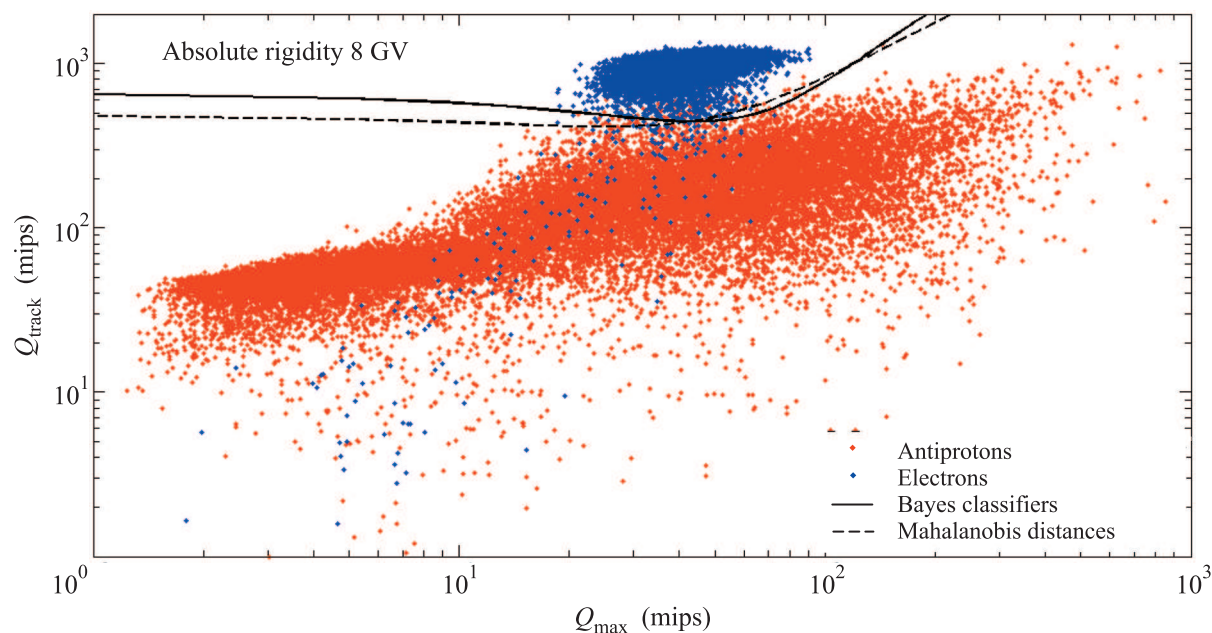


Рис. 1. Пример применения алгоритмов классификации для разделения электронов и антипротонов в случае двух параметров: Q_{\max} и Q_{track}

типротоны рождаются во взаимодействиях высокоэнергетичной ядерной компоненты космического излучения с межзвездным газом (см., например, [3, 4]) и для изучения проблемы барионной асимметрии необходимо зарегистрировать более тяжелые антиядра или по крайней мере установить верхний предел на их поток [5].

Кинематические расчеты показали, что в случае вторичного рождения антипротонов их энергетический спектр имеет максимум около 2 ГэВ и спадает в сторону малых энергий из-за порога рождения. При энергиях выше нескольких десятков ГэВ спектр вторичных антипротонов становится круче, чем у протонов. Это приводит к небольшому понижению отношения их потоков [6].

Сегодня интерес к изучению антипротонов по-прежнему сохраняется. Он связан с решением проблем генерации, ускорения и распространения в Галактике космических лучей, а также одной из основных проблем – природы “темной” материи, т.е. выяснения свойств гипотетических массивных слабо взаимодействующих частиц – ВИМП (от англ. *WIMP – Weakly Interacting Massive Particle*). Существование ВИМП выходит за рамки стандартной модели физики элементарных частиц и рассматривается в моделях суперсимметрии, многомерного пространства, техницвета и т.д. [7]. Одно из принципиальных свойств ВИМП – их взаимная аннигиляция с образованием пар из частиц и античастиц, например элек-

тронов/позитронов или протонов/антипротонов. Сегодня также рассматривается возможность распада частиц “темной” материи с образованием антилептонов или антибарионов.

В настоящее время с помощью магнитного спектрометра ПАМЕЛА [8] (от англ. *PAMELA – a Payload for Antimatter Matter Exploration and Light nuclei Astrophysics*) проводятся прецизионные измерения потоков античастиц в первичном космическом излучении. Запуск ИСЗ Ресурс-ДК1 с установленной на борту научной аппаратурой состоялся в июне 2006 г. Спектрометр расположен внутри герметичного контейнера. Он включает в себя следующие детекторные системы: времяпролетную системы (ВПС), координатную трековую систему (трекер) в магнитном поле, координатно-чувствительный калориметр, систему антисовпадений, нижний сцинтилляционный ливневый детектор, нейтронный детектор. Такой набор позволяет определять величину и знак заряда, жесткость, скорость, массу и энергию частиц.

В 2010 г. были опубликованы энергетические спектры галактических антипротонов и энергетическая зависимость отношения потоков антипротонов и протонов в диапазоне энергий от 60 МэВ до 180 ГэВ, полученные с использованием информации, накопленной до конца 2008 г. [9]. Данные в таком диапазоне энергий получены впервые. Анализ приведенных результатов показал, что они согласуются с расчетами в программе GALPROP без введения допол-

нительных источников антипротонов [10]. Это означает, что антипротоны являются вторичными галактическими частицами, возникающими во взаимодействиях высокоэнергетичных космических адронов с межзвездным веществом. Вместе с тем статистической обеспеченности результатов, особенно вблизи верхней энергетической границы, недостаточно для надежного исключения других источников.

В настоящей работе для увеличения статистики и получения результатов при более высоких энергиях был оптимизирован отбор антипротонов по калориметру и проведен анализ “спилловера”, т.е. ошибки в измерении знака заряда из-за конечного пространственного разрешения спектрометра и рассеяний на малые углы во внутренних плоскостях трекера. Кроме того, для анализа была использована информация, накопленная до января 2010 г.

Основные критерии отбора событий аналогичны использовавшимся ранее [5, 9, 11].

Первичные космические лучи выделяются условием $R > 1.2R_C$, где R_C – локальная жесткость геомагнитного обреза в месте регистрации события с жесткостью R (определенной по трекеру). Жесткость R_C вычисляется при помощи расчетов местоположения спутника в модели SGP-4 по данным NORAD [12] и напряженности магнитного поля Земли в модели IGRF [13].

Для исключения из анализа электронов, доля которых в космических лучах на 2–3 порядка превышает долю антипротонов, требуется дополнительный отбор. Он связан с использованием информации от калориметра, имеющего толщину ~ 0.6 ядерных и ~ 16 электромагнитных длин. Электромагнитные и адронные взаимодействия отличаются топологией, обусловленной разной природой образующих ливни частиц. Для того чтобы охарактеризовать ливни, введены параметры, которые описывают продольный и поперечный профили, начальную точку взаимодействия и энерговыведения в разных частях ливня. Например, Q_{\max} – максимальное энерговыведение в калориметре, Q_{track} – энерговыведение вдоль восстановленной оси ливня. Подробнее эти параметры описаны в работах [11, 14] и ссылках в них.

В нашем случае имеется большое количество параметров. Поэтому для разделения электронов и антипротонов была использована математическая модель классификации данных, являющаяся частью алгоритмов MVA (от англ. *Multivariate analysis* – *многомерный анализ*) [15]. Классификация – процесс группировки объектов исследования или наблюдения в соответствии с их общими признаками. Постановка задачи имеет следующий вид. Пусть существует

множество объектов, принадлежащих к разным известным классам по набору признаков. В нем задано конечное подмножество объектов, для которых класс известен (обучающая выборка). Требуется построить алгоритм, способный указать класс, к которому относится произвольный объект. В работе обучающая выборка построена на основе моделирования прохождения электронов и антипротонов через спектрометр. При этом для двух классов (типов частиц) формируется множество значений всех параметров, по которым происходит классификация. Для моделирования в коллаборации ПАМЕЛА разработана программа на основе пакета GEANT 3.21 [16], которая воспроизводит характеристики аппаратуры, полученные в калибровках на ускорителе. Их стабильность регулярно проверяется в полете.

Алгоритмы классификации реализованы в среде MatLab [17]. Результатом является гиперповерхность в пространстве размерностью, равной числу использованных параметров. Гиперповерхность разделяет пространство на две части. В одной сосредоточены электронные, а в другой – антипротонные события.

Проиллюстрировать метод можно на примере параметров Q_{\max} и Q_{track} . Распределение электронов и антипротонов по ним для жесткости 8 ГВ приведено на рис. 1. Для оптимального разделения областей точек, принадлежащих разным типам частиц, в работе использованы два метода классификации: вероятностный (простой классификатор Байеса) и метрический (основан на вычислении расстояния Махаланобиса) [15, 18]. Построенные разделяющие границы показаны сплошной и штриховой линиями соответственно. На рис. 2 представлена полученная класси-

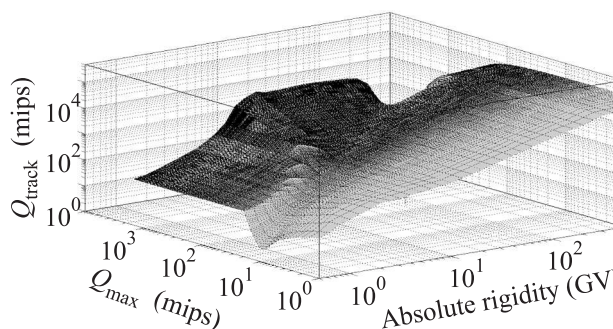


Рис. 2. Разделяющая гиперповерхность в случае параметров Q_{\max} , Q_{track} и модуля измеренной жесткости

фикатором Байеса поверхность в координатах Q_{\max} , Q_{track} , R , где R – жесткость частиц, определенная по трекеру.

Для разделения электронов и антипротонов в области низких энергий ($|R| < 2$ ГВ) дополнительно использовались независимые измерения ионизационных потерь в плоскостях трекера и счетчиках ВПС.

Путем расчетов методом Монте-Карло получены режекция электронов лучше 10^{-4} и эффективность отбора антипротонов выше 90% во всем энергетическом диапазоне (рис. 3). При этом ожидаемая примесь

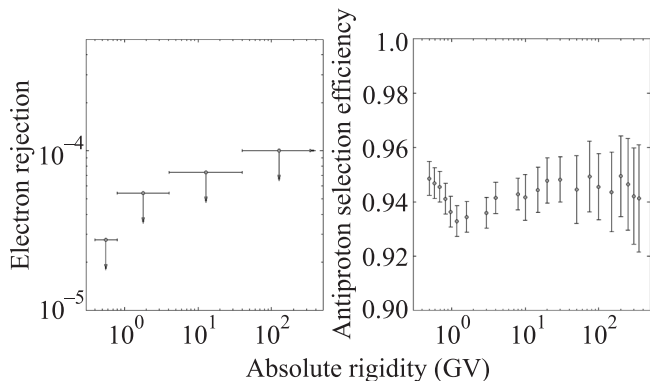


Рис. 3. Режекция электронов (слева) и эффективность выделения антипротонов (справа), полученные в данной работе

электронов в окончательной выборке антипротонов не превышает 1–2%.

Для проверки “спилловера” использовались следующие критерии отбора событий [5]:

- траектория, восстановленная по трекеру, должна проходить через стрип первой плоскости калориметра с ненулевым энерговыделением;
- координаты прохождения частицы, измеренные верхними счетчиками ВПС и восстановленные по данным трековой системы, должны совпадать;
- жесткости, измеренные с использованием различных частей траектории внутри магнита, должны совпадать;
- должно соблюдаться ограничение на количество стрипов, сработавших при прохождении частицы, во всех плоскостях трекера;
- должно соблюдаться ограничение на количество сигналов в треkere, не принадлежащих восстановленному треку;
- должно соблюдаться ограничение на измеренную жесткость, $|R| < \text{MDR}/3$, где MDR – максимально возможная измеряемая жесткость (*Maximum Detectable Rigidity*). Она вычислялась для каждого события с учетом топологии трека и ошибок измерения координат в каждой из плоскостей. Данное условие позволяет расширить энергетический диапазон измере-

ний до 350–400 ГэВ по сравнению с предыдущей работой [9].

На рис. 4 показано распределение по отклонению в магнитном поле спектрометра отобранных отрица-

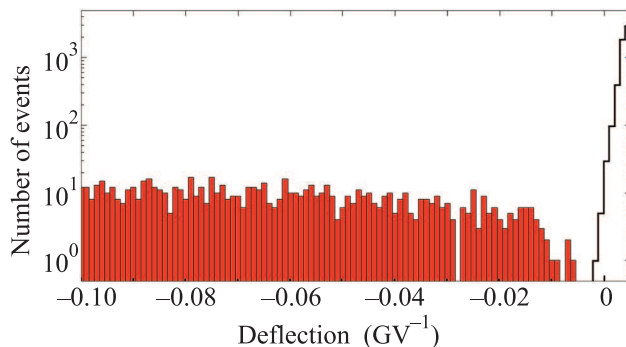


Рис. 4. Распределение событий по отклонению в магнитном поле спектрометра для отобранных антипротонов (затененная гистограмма) и протонов

тельно и положительно заряженных частиц. Продемонстрировано хорошее разделение выделенных антипротонов (затененная гистограмма) и “спилловера” протонов.

В результате проведенного анализа выделено ~ 2800 антипротонов в диапазоне энергий от 60 МэВ до 350 ГэВ. В диапазонах энергий от 60 до 150 МэВ и от 180 до 350 ГэВ античастиц не обнаружено. Установлены верхние пределы на их потоки (90% Д.В.). При применении оптимизированной методики получено согласие с предыдущими опубликованными результатами [9] (рис. 5). Однако при этом

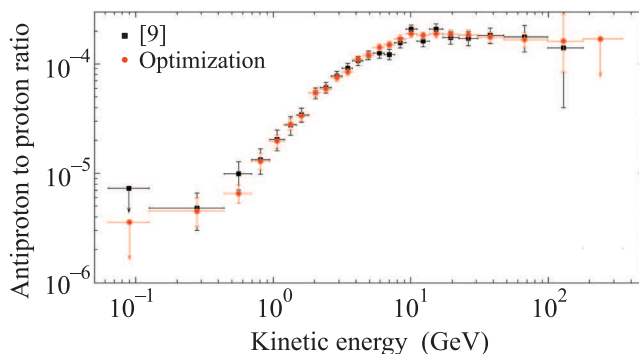


Рис. 5. Отношение потоков антипротонов и протонов: сравнение опубликованных результатов [9] и результатов после оптимизации

увеличена статистика и расширен энергетический диапазон измерений. Систематическая ошибка оценена путем применения различных классификаторов для электрон-антипротонного разделения, проверки методов на различных выборках моделирования, а

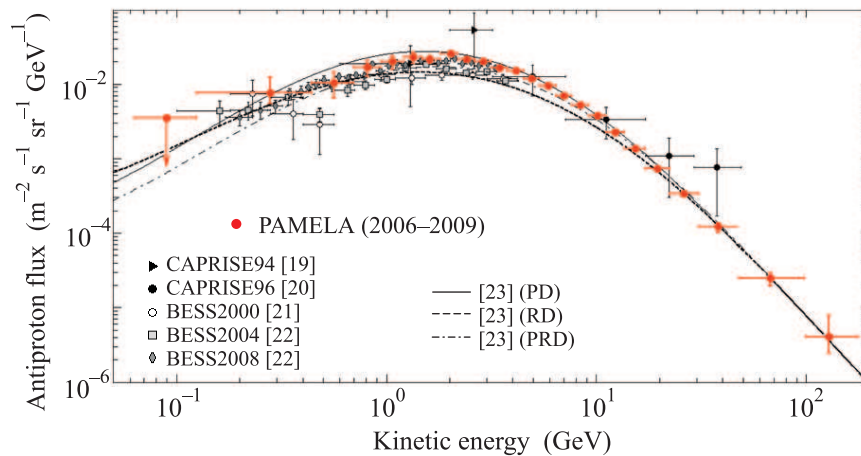


Рис. 6. Интенсивность антипротонов первичного космического излучения, полученная в данной работе, в сравнении с экспериментальными измерениями [19–22] и теоретическими расчетами [23] для модели только вторично происхождения антипротонов при взаимодействии космических лучей с межзвездной средой. Сплошной, штриховой и пунктирной линиями показаны расчеты в случаях плоской диффузии, диффузии с доускорением и диффузии с доускорением и дам-пингом

также анализа “спилловера” с использованием различных наборов параметров и алгоритмов нечеткой логики. Окончательный результат оказался стабилен в пределах 2–10% в зависимости от энергии.

Для восстановления спектра антипротонов и построения отношения потоков антипротонов и протонов были определены эффективности отбора событий с использованием экспериментальных данных и моделирования методом Монте-Карло. Введены поправки на различные эффективности отбора, связанные с аннигиляцией античастиц в спектрометре.

Полученные результаты, сведенные в таблицу, позволяют проводить более детальное сравнение с теоретическими моделями.

На рис. 6 показан измеренный дифференциальный энергетический спектр антипротонов в сравнении с современными теоретическими расчетами вторичного рождения античастиц в Галактике и распространения в межзвездной среде для случаев простой диффузии, диффузии с доускорением и диффузии с доускорением и дам-пингом [23]. При низких энергиях ($E < (10–15)$ ГэВ) поток ГКЛ подвержен солнечной модуляции. Ее упрощенное описание возможно на основе модели “силового поля” с одним параметром – потенциалом солнечной модуляции [24]. В приведенных расчетах использовано его значение 550 МэВ, которое близко к экспериментальному [25]. Это позволяет сделать вывод о том, что спектр антипротонов в области низких энергий наилучшим образом описывается простой диффузионной моделью.

На рис. 7 измеренное отношение потоков антипротонов и протонов сравнивается с расчетами [23] для

Жесткость, ГВ	Кин. энергия, ГэВ	Интенсивность, 10^{-3} , част. / $(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{ГэВ})$	$\bar{p}/p \cdot 10^{-5}$
0.35–0.50	0.09	< 3.50	< 0.35
0.50–1.01	0.28	$7.68^{+2.75}_{-1.90}$	$0.45^{+0.16}_{-0.12}$
1.01–1.34	0.56	10.43 ± 3.86	0.66 ± 0.13
1.34–1.63	0.81	16.79 ± 3.92	1.29 ± 0.22
1.63–1.93	1.07	20.23 ± 4.00	1.96 ± 0.26
1.93–2.23	1.34	22.78 ± 4.06	2.80 ± 0.32
2.23–2.58	1.63	21.65 ± 2.56	3.32 ± 0.33
2.58–2.99	2.03	25.75 ± 2.33	5.45 ± 0.44
2.99–3.45	2.42	21.44 ± 1.83	5.93 ± 0.45
3.45–3.99	2.90	20.05 ± 1.76	7.50 ± 0.55
3.99–4.62	3.47	16.46 ± 1.34	8.48 ± 0.60
4.62–5.36	4.14	15.26 ± 1.13	10.9 ± 0.7
5.36–6.23	4.93	11.79 ± 0.77	12.0 ± 0.8
6.23–7.3	5.90	9.47 ± 0.59	14.1 ± 1.0
7.3–8.5	7.0	6.92 ± 0.45	14.9 ± 1.1
8.5–10.1	8.4	5.18 ± 0.40	16.9 ± 1.2
10.1–12.0	10.1	3.76 ± 0.26	18.8 ± 1.4
12.0–14.6	12.3	2.25 ± 0.18	18.2 ± 1.4
14.6–18.1	15.3	1.36 ± 0.13	18.8 ± 1.5
18.1–23.3	19.60	0.727 ± 0.070	18.7 ± 1.7
23.3–31.7	26.20	0.338 ± 0.029	18.4 ± 2.0
31.7–48.5	38.00	0.122 ± 0.016	17.5 ± 1.9
48.5–100.0	67.4	0.025 ± 0.005	16.7 ± 2.5
100.0–180.0	128.9	$0.0045^{+0.0037}_{-0.0019}$	$16.1^{+12.7}_{-7.7}$
180.0–350.0	240	< 0.0008	< 16.7

случая простой диффузии. Пунктирные линии показывают результаты вычислений вторичной компоненты антипротонов с учетом неопределенностей при распространении частиц в межзвездной среде и сече-

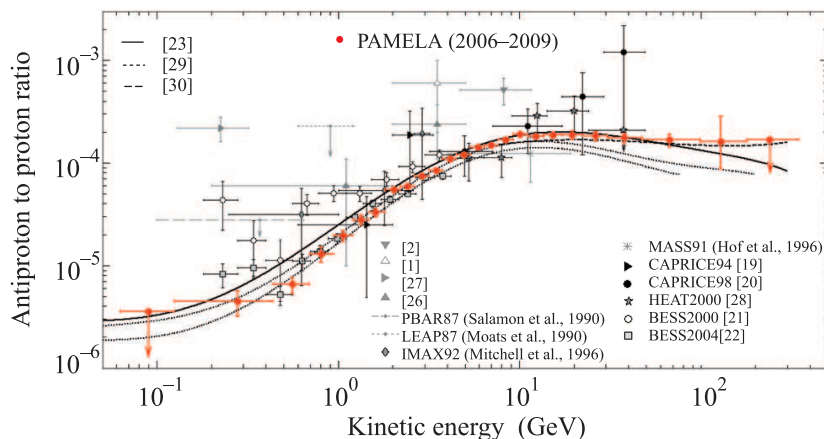


Рис. 7. Отношение потоков антипротонов и протонов первичного космического излучения, полученное в данной работе, в сравнении с измерениями [1, 2, 26, 19–22, 28] и теоретическими расчетами в модели вторичного происхождения [29] (пунктирная линия) и [23] (сплошная линия). Штриховой линией показаны расчеты [30] для вторичного происхождения антипротонов, включая дополнительную компоненту, рожденную и ускоренную в источниках космических лучей

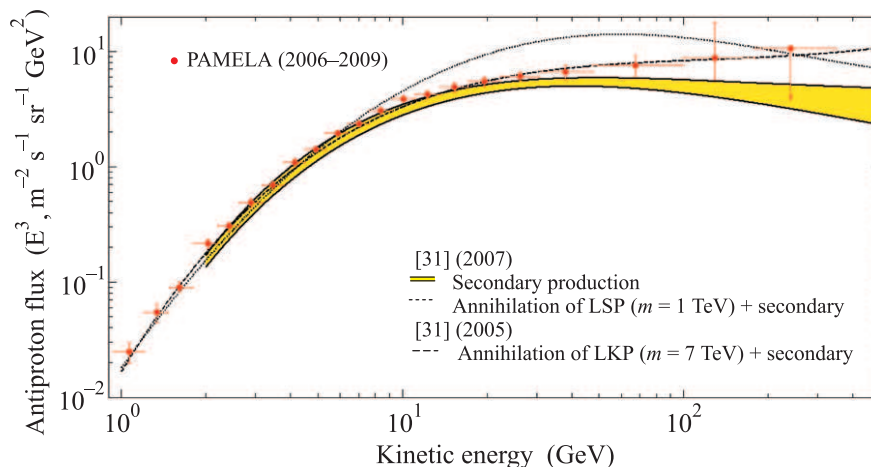


Рис. 8. (Цветной онлайн) Интенсивность антипротонов, полученная в данной работе (умноженная на E^3). Желтая полоса показывает неопределенность потока антипротонов вторичного происхождения для различных моделей диффузии в межзвездной среде. Штриховая и пунктирная линии соответствуют сигналу от аннигиляции различных частиц-кандидатов в “темную” материю [31].

ний их рождения [29]. При высоких энергиях экспериментальные результаты находятся выше теоретических предсказаний [29]. Это требует введения дополнительного источника. Им может быть, например, рождение антипротонов на фронтах ударных волн при взрывах сверхновых. Такие расчеты проведены в работе [30] (показаны на рисунке штриховой линией). Они позволяют хорошо описать экспериментальные результаты.

На рис. 8 приводится сравнение интенсивности антипротонов, умноженной на E^3 , с теоретическими расчетами [31], привлекающими при высоких энергиях дополнительный источник в виде аннигиляции частиц темной материи. Сплошные линии на рисунке

демонстрируют неопределенность предсказания потока только вторичной компоненты. Расчеты для аннигиляции легких суперсимметричных частиц с массой 1 ТэВ и состояний Калуцы–Кляйна с массой 7 ТэВ приведены пунктирной и штриховой линиями соответственно.

Результаты эксперимента ПАМЕЛА позволяют изучать природу гипотетических массивных частиц темной материи, в частности устанавливать некоторые ограничения на параметры соответствующих моделей (например, [32]).

Примененный в работе метод выделения событий оказался эффективным, позволив улучшить экспериментальные результаты, представляющие большой

интерес. Их объяснение возможно не только с помощью механизмов вторичного рождения антипротонов в Галактике, но и с привлечением новых источников.

Авторы выражают благодарность Совету по космосу РАН, федеральному космическому агентству “Роскосмос”, ФГУП ГНПРКЦ “ЦСКБ-Прогресс”, Научному центру оперативного мониторинга Земли, Итальянскому космическому агентству, Немецкому аэрокосмическому центру, Шведскому национальному космическому совету, Шведскому исследовательскому совету.

1. E. A. Bogomolov, N. D. Lubyayana, V. A. Romanov et al., ICRC (1979).
2. R. L. Golden, S. Horan, B. G. Mauget et al., Phys. Rev. Lett. **43**, 1196 (1979).
3. М. И. Фрадкин, ЖЭТФ **29** 147 (1955).
4. S. A. Stephens, Astrophysics and Space Science **76**, 87 (1981).
5. A. G. Mayorov, A. M. Galper, O. Adriani et al., JETP Letters **93**(11), 628 (2011).
6. M. Simon, A. Molnar, and S. Roesler, Astrophys. J. **499**, 250 (1998).
7. G. Bertone, D. Hooper, and J. Silk, Phys. Rep. **405**, 279 (2005).
8. P. Picozza, A. M. Galper, O. Adriani et al., Astropart. Phys. **27**, 296 (2007).
9. O. Adriani, G. C. Barbarino, G. A. Bazilevskaya et al., Phys. Rev. Lett. **105**, 121101 (2010).
10. I. V. Moskalenko, Astrophys. J. **565**, 280 (2002).
11. O. Adriani, G. C. Barbarino, G. A. Bazilevskaya et al., Phys. Rev. Lett. **102**, 051101 (2009).
12. <https://www.space-track.org/>
13. <http://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/models/geomagnetic/igrf/>
14. O. Adriani, G. C. Barbarino, G. A. Bazilevskaya et al., Nature **458**, 607 (2009).
15. W. J. Krzanowski, *Principles of Multivariate Analysis: A User's Perspective*, N.Y., Oxford University Press, 1988.
16. R. Brun et al., computer code GEANT, CERN program library, 1994, version 3.21.
17. <http://www.mathworks.com/>
18. G. A. F. Seber, *Multivariate Observations*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, Inc., 1984.
19. M. Boezio, P. Carlson, T. Francke et al., Astrophys. J. **487**, 415 (1997).
20. M. Boezio, V. Bonvicini, P. Schiavon et al., Astrophys. J. **561**, 787 (2001).
21. Y. Asaoka, Y. Shikaze, K. Abe et al., Phys. Rev. Lett. **88**, 051101 (2002).
22. K. Abe, H. Fuke, S. Haino et al., Phys. Lett. B **670**, 103 (2008).
23. V. S. Ptuskin, I. V. Moskalenko, and F. C. Jones, Astrophys. J. **642**, 902 (2006).
24. L. J. Gleeson and W. I. Axford, Astrophysical Journal **154**, 11011 (1968).
25. А. Г. Майоров, О. Адриани, Г. А. Базилевская и др., Изв. РАН, сер. физ. **75**, 846 (2011).
26. E. A. Bogomolov, G. I. Vasilyev, S. Yu. Krut'kov et al., ICRC (1987).
27. A. Buffington, S. M. Schindler, and C. R. Pennypacker, Astrophys. J. **248**, 1179 (1981).
28. A. S. Beach, J. J. Beatty, A. Bhattacharyya et al., Phys. Rev. Lett., **87**, 271101 (2001).
29. F. Donato, D. Maurin, and P. Brun, Phys. Rev. Lett. **102**, 071301 (2009).
30. P. Blasi and P. D. Serpico, Phys. Rev. Lett. **103**, 081103 (2009).
31. T. Bringmann, arXiv:astro-ph/0506219v2.22 (2005); arXiv:astro-ph/0612514v2.2 (2007).
32. I. Cholis, arXiv:astro-ph/1007.1160v2 (2011).