

На правах рукописи

Майоров Андрей Георгиевич

**ПОТОКИ ИЗОТОПОВ ЛЕГКИХ АНТИЯДЕР В ПЕРВИЧНЫХ
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ**

Специальность 01.04.16. - " Физика атомного ядра и элементарных частиц "

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Автор:



Москва - 2012

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете
«МИФИ» (НИЯУ МИФИ)

Научный руководитель:

Заслуженный деятель науки Российской Федерации,
доктор физико-математических наук, профессор Гальпер Аркадий Моисеевич

Официальные оппоненты:

Птускин Владимир Соломонович, доктор физико-математических наук,
Учреждение Российской академии наук - Институт земного магнетизма, ионосферы и
распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, заведующий лабораторией

Рябов Владимир Алексеевич, доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки - Физический институт
имени П.Н. Лебедева РАН, главный научный сотрудник

Ведущая организация: Институт ядерных исследований РАН, Москва

Защита состоится «14» марта 2012 г. в 17 час. 00 мин.

на заседании диссертационного совета Д 212.130.07 при НИЯУ МИФИ
по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, д.31, тел. 324-84-98, 323-92-51

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан «___» февраля 2012 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре,
заверенный печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



С.Е. Улин

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Работа посвящена измерению потока антипротонов и поиску антиядер дейтронов и гелия в первичном космическом излучении.

Галактические *антипротоны* впервые обнаружены в восьмидесятих годах прошлого столетия. Основная причина, вызывавшая интерес к их изучению, была связана с решением проблемы барионной асимметрии Вселенной. Однако сегодня не вызывает сомнения, что космические антипротоны рождаются во взаимодействиях высокоэнергетичной ядерной компоненты космического излучения с межзвёздным газом, и для изучения проблемы барионной асимметрии необходимо зарегистрировать более тяжёлые антиядра. Тем не менее, в настоящее время интерес к изучению антипротонов по-прежнему сохраняется и определяется решением проблем генерации, ускорения и распространения космических лучей в Галактике. А так же решением одной из основных проблем - природы тёмной материи, т.е. выяснением свойств гипотетических массивных слабо взаимодействующих частиц (ВИМПов, от англ. WIMP - Weakly Interacting Massive Particle). Их существование выходит за рамки стандартной модели физики элементарных частиц и рассматривается в моделях суперсимметрии, многомерного пространства, техницвета и др. Одно из принципиальных свойств ВИМПов - их взаимная аннигиляция с образованием пар из частиц и античастиц, например, электронов/позитронов или протонов/антипротонов. Сегодня также рассматривается возможность распада частиц тёмной материи с образованием антилептонов или антибарионов. Особый интерес к этим источникам вызывает возможность с их помощью объяснить «аномальный эффект «ПАМЕЛЫ»», связанный со значительным превышением доли позитронов в космическом излучении, нежели в модели их вторичного образования. Проведенные до запуска эксперимента «ПАМЕЛА» измерения не могут ответить на многие поставленные вопросы из-за больших статистических ошибок и узкого энергетического диапазона.

Антидейтроны к настоящему моменту в космических лучах не обнаружены, но и их поиск не менее важен, т.к. они могут (с меньшей вероятностью) рождаться теми же механизмами, что и антипротоны.

Антигелий также не обнаружен: в случае его вторичного происхождения расчетное отношение потоков антигелия и ядер гелия мало и не превосходит $\sim 10^{-12} - 10^{-14}$. Обнаружение антиядер выше этого значения свидетельствовало бы о существовании доменов антиматерии, которые не исключаются в моделях неоднородного бариосинтеза. Тем не менее, установление верхнего предела на поток антиядер позволяет определять параметры этих моделей. Его наиболее низкое на настоящий момент значение для отношения потоков антигелия и гелия получено в аэростатном эксперименте только в области малых энергий. При этом поток антиядер от далекого источника будет подавлен как из-за наличия остаточной атмосферы, так и из-за малой длины свободного пробега в Галактике и большого сечения аннигиляции.

Настоящая диссертационная работа основана на данных космофизического эксперимента «ПАМЕЛА», созданного специально для решения перечисленных выше задач, что определяет её актуальность. Проведение измерений на околоземной орбите позволяет непосредственно изучать галактическую компоненту космического излучения за пределами остаточной атмосферы.

Цель работы. Получить энергетический спектр антипротонов и провести поиск антиядер дейтронов и гелия в первичном космическом излучении с использованием научной информации, полученной в эксперименте «ПАМЕЛА» с 2006 по 2009 г.

Научная новизна работы.

- Впервые получены дифференциальный энергетический спектр антипротонов и отношение потоков антипротонов и протонов в диапазоне энергий от 0.06 до 180 ГэВ в первичном космическом излучении. Эти результаты представляют интерес для создания моделей генерации и распространения частиц в Галактике, а также для поиска и изучения природы гипотетических частиц тёмной материи.
- Установлен верхний предел отношения потоков антидейтронов и дейтронов, который в диапазоне энергий 0.05-0.83 ГэВ/нуклон равен $1.1 \cdot 10^{-5}$ (с доверительной вероятностью 95%). Предел позволил надёжно исключить присутствие антидейтронов на этом уровне.

- Установлен верхний предел отношения потоков антигелия и гелия, который в диапазоне жёсткостей от 0.6 до 600 ГВ равен $4.7 \cdot 10^{-7}$ (с доверительной вероятностью 95%). Предел является наиболее низким при жёсткостях свыше 14 ГВ и позволяет установить ограничение на размер доменов антиматерии в Галактике и, как следствие, на параметры неоднородного бариосинтеза.
- Разработан новый метод выделения антипротонов на фоне электронов, основанный на математической модели классификации данных с использованием различий во взаимодействии частиц в калориметре, и позволивший повысить в ~ 1.5 раза эффективность отбора полезных событий.
- Разработан метод исключения из анализа событий с рассеяниями во внутренних детекторах трековой системы, приводящими к неправильному измерению кривизны траектории и знака заряда. Он основан на определении кривизны траектории по различным комбинациям сработавших плоскостей вдоль трека частицы. Метод позволил получить спектр антипротонов при энергиях от 0.06 до 350 ГэВ, и провести поиск антиядер в указанных выше энергетических диапазонах.

Результаты, выносимые на защиту.

- Дифференциальный энергетический спектр антипротонов и отношение потоков антипротонов и протонов в диапазоне энергий от 0.06 до 350 ГэВ в первичном космическом излучении.
- Верхний предел отношения потоков антидейтронов и дейтронов, равный $1.1 \cdot 10^{-5}$ (с доверительной вероятностью 95%) в диапазоне энергий 0.05-0.83 ГэВ/нуклон в первичном космическом излучении.
- Верхний предел отношения потоков антигелия и гелия, равный $4.7 \cdot 10^{-7}$ (с доверительной вероятностью 95%) в диапазоне жёсткостей от 0.6 до 600 ГВ в первичном космическом излучении.
- Метод выделения антипротонов на фоне электронов при помощи позиционно-чувствительного калориметра в эксперименте «ПАМЕЛА».
- Метод идентификации событий с рассеяниями во внутренних детекторах трековой системы в эксперименте «ПАМЕЛА».

Практическая ценность работы.

- Представленные в диссертационной работе результаты о потоках антиядер в первичном космическом излучении уже используются при разработке моделей генерации и распространения космических лучей, включая возможный распад или аннигиляцию гипотетических частиц тёмной материи.
- Применённый в диссертационной работе метод идентификации античастиц может быть использован в подобных экспериментальных исследованиях, где необходимо эффективное выделение событий на уровне большого фона.

Вклад автора. Изложенные в диссертационной работе результаты, получены автором лично, либо при его активном участии.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы были представлены на:

- 22ом Европейском симпозиуме по космическим лучам, г. Турку, Финляндия, 2010г.
- 31ой Всероссийской конференция по космическим лучам, г. Москва, Россия, 2010г.
- Сессии-конференции секции ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий» (ИТЭФ), г. Москва, Россия, 2011 г.
- Курчатовской молодёжной научной школе, г. Москва, Россия, 2009, 2011 гг.
- Научных сессиях МИФИ, г. Москва, Россия, 2009, 2010, 2011 гг.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 27 печатных научных работ, в том числе 13 в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из аннотации, введения, пяти глав, заключения, списка литературы и одного приложения.

Во **введении** приводится общая характеристика работы, обосновывается важность и актуальность поставленной задачи.

Глава 1 «Антиядра в первичном космическом излучении» содержит обзор теоретических работ, связанных с источниками античастиц в Галактике и распространением космических лучей в межзвёздной среде и Гелиосфере.

Глава 2 «Эксперименты по обнаружению антиядер» представляет собой обзор современного состояния исследований антиядер на ускорителях и в первичном космическом излучении.

Глава 3 «Эксперимент «ПАМЕЛА»» посвящена подробному описанию научной аппаратуры: приводится назначение, устройство и характеристики каждой из детекторных систем. Приводится описание системы приёма информации со спутника и первичной обработки данных.

Глава 4 «Обработка экспериментальных данных» посвящена созданию методов идентификации частиц и определению физических характеристик спектрометра (светосила, энергетическое разрешение) с их учётом.

В Главе 5 «Анализ экспериментальных данных» приводится сравнение полученных результатов с теоретическими расчётами генерации и распространения античастиц в межзвёздной среде.

Приложение в виде таблицы содержит спектр антипротонов и отношение потоков антипротонов и протонов в зависимости от кинетической энергии.

Общий объём 125 страниц, включая 65 рисунков, 4 таблицы и список литературы из 180 наименований.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

На сегодняшний день исследование потоков антиядер в первичном космическом излучении необходимо для понимания природы возникновения барионной асимметрии Вселенной, поиска и изучения гипотетических частиц скрытой массы, первичных черных дыр, а также изучения механизмов распространения частиц и античастиц в Галактике и Гелиосфере.

В Главе 1 приведён обзор теоретических моделей по теме диссертации. Современные модели генерации космических лучей предполагают их образование и ускорение после вспышек сверхновых на ударных волнах. При распространении в межзвёздной среде доля различных компонент в космических лучах меняется в результате ядерных реакций с межзвёздным газом. Кроме того, рождаются вторичные частицы или античастицы, первоначально отсутствующие в источниках, например,

позитроны, антипротоны, антидейтроны или антигелий. Также не исключено рождение галактических антипротонов в результате аннигиляции или распада массивных гипотетических частиц тёмной материи или при испарении первичных черных дыр. При этом рассчитанные потоки могут превышать поток вторичной компоненты. В таких же механизмах, но с меньшей вероятностью могут образовываться антидейтроны. В случае только вторичного происхождения антигелия отношение его потока к ядрам гелия составляет $10^{-12} - 10^{-14}$. Обнаружение антиядра выше этого значения свидетельствовало бы о существовании доменов антиматерии в форме скоплений антизвезд, антигалактик и др., их образование возможно в моделях неоднородного бариосинтеза.

В *Главе 2* приведён обзор экспериментов, созданных для регистрации антиядер в первичном космическом излучении. Антипротоны и антиядра \bar{d} , \bar{t} , \overline{He} к настоящему времени обнаружены на ускорителях, и при этом подтверждены *CPT*-теорема и зарядовая инвариантность ядерных сил, что делает возможным их присутствие в космическом излучении.

Первые попытки зарегистрировать антиядра в составе космических лучей были сделаны в начале 1960-х годов при помощи стопок ядерных эмульсий, запущенных на аэростатах [1]. Остановившиеся античастицы должны были идентифицироваться по процессу аннигиляции с веществом детектора. В 1964 г. Н.Л. Григоров [2] и в 1968 г. И.О. Иванова [3] впервые провели эксперименты с эмульсиями на первых искусственных спутниках Земли. Активно развивающиеся методы регистрации и выделения событий были использованы в последующих аэростатных экспериментах П. Эвенсона [4], А. Баффингтона [5], Г.Ф. Смута [6] и Р.Л. Голдена [7]. Наконец, в конце 1970х годов группами В.А. Романова [8] и Р.Л. Голдена [9] независимо впервые в космических лучах были зарегистрированы антипротоны. Впоследствии их исследование продолжилось в советских и, преимущественно, в иностранных экспериментах. Например, на основе приборов PBAR [10] и LEAP [11] реализованы соответствующие эксперименты, а модернизация их отдельных детекторных систем позволила поставить эксперименты MASS, MASS2 [12], IMAX [13], CAPRICE94 [14],

CAPRICE98 [15]. Несмотря на большие статистические ошибки, результаты большинства из измерений при энергиях до 10 ГэВ согласуются с моделью вторичного происхождения антипротонов в Галактике.

Сравнительный прогресс в исследовании/поиске антиматерии при низких энергиях произошёл в 1990х с созданием магнитного спектрометра BESS [16], основным преимуществом которого является большой геометрический фактор. Получены результаты с хорошей статистической точностью о потоке антипротонов с энергиями ниже 3 ГэВ и установлен наиболее низкий на сегодня верхний предел отношения потоков антигелия и гелия при жёсткостях ниже 14 ГВ. Эксперимент AMS-01 [17], также направленный на исследование антиматерии в космических лучах, проводился в 1998г. в космосе на борту шатла STS-91. Основным результатом, связанным с исследованием антиядер, является наиболее низкий верхний предел для отношения потоков антигелия и гелия в диапазоне жёсткостей 14-140 ГВ.

В *Главе 3* приведено описание физической схемы и принципа работы магнитного спектрометра «ПАМЕЛА» [18] (рисунок 1).

«ПАМЕЛА» (от англ. PAMELA – a Payload for Antimatter Matter Exploration and Light nuclei Astrophysics) - это спутниковый эксперимент, предназначенный для прецизионных измерений потоков заряженных частиц и античастиц в космическом излучении. Научная аппаратура «ПАМЕЛА» расположена внутри герметичного контейнера на борту спутника «Ресурс ДК-№1». 15 июня 2006 г. он был выведен на околополярную орбиту с высотой от 350 до 600 км, и наклоном 70° . Научная аппаратура включает набор детекторных систем, служащих для идентификации типа частицы, измерения величины и знака заряда, жёсткости, скорости, массы и энергии частиц.

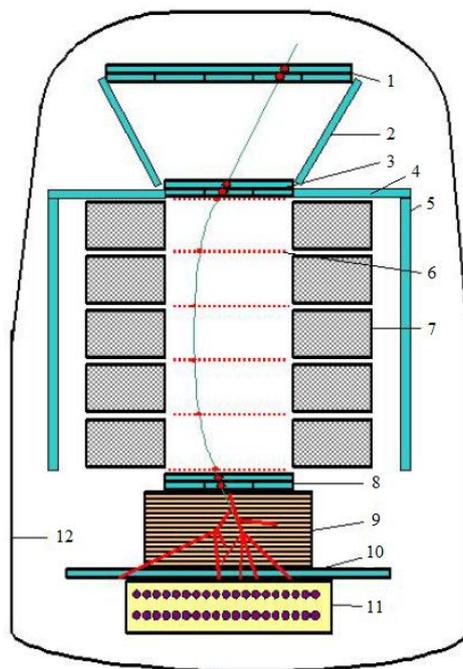


Рисунок 1. Физическая схема спектрометра «ПАМЕЛА»

В состав научной аппаратуры входят:

1. Магнитный спектрометр (трековая система 6 и постоянный магнит 7).

Магнитная система предназначена для измерения импульса частиц по отклонению их траектории в магнитном поле с напряжённостью 0.43 Тл, создаваемом постоянным магнитом. Для определения отклонения, внутри магнита размещена трековая система или трекер, которая состоит из шести плоскостей высокоточных кремниевых микростриповых детекторов, измеряющих координаты прохождения частиц через прибор с пространственным разрешением 3.0 мкм в отклоняющей (X) проекции и 11.5 мкм в другой (Y) проекции. Максимальная регистрируемая жесткость, для которой относительная ошибка измерения составляет 100%, равна $\approx 1\text{ТВ}$. Геометрический фактор спектрометра $21.5\text{ см}^2\text{ср}$.

2. Времяпролетная система (ВПС) 1, 3, 8. Функции: выработка первичного триггера научной аппаратуры, измерение времени пролета частиц через спектрометр с использованием различных комбинаций детекторов системы для определения скорости, подавление фоновых и альбедных частиц. ВПС включает в себя шесть плоскостей твердых пластических сцинтилляторов, сгруппированных попарно, и разделённых на взаимно ортогональные (в каждой паре) полосы. Временное разрешение для однозарядных частиц $\sim 250\text{ пс}$, для частиц с большим зарядом оно улучшается и для углерода составляет $\sim 70\text{ пс}$.

3. Система антисовпадений (АС) 2, 4, 5. Служит для определения срабатываний, которые выработаны вторичными частицами, рождёнными в контейнере или механических частях прибора. НА «ПАМЕЛА» включает несколько систем антисовпадений, которые покрывают бока и верх магнита, а также окружают объем между первыми двумя времяпролетными плоскостями.

4. Электромагнитный калориметр 9. Прибор предназначен для разделения электронов/позитронов и антипротонов/протонов, а также измерения энергии взаимодействующих в нём частиц. Калориметр состоит из 44 плоскостей односторонних кремниевых позиционно-чувствительных детекторов, чередующихся с 22 пластинами вольфрамового поглотителя, что составляет ~ 16.3 радиационных и

~ 0.6 ядерных длин. Такие характеристики позволяют проводить дискриминацию частиц на основе анализа трехмерной картины развития адронных и электромагнитных ливней внутри калориметра.

5. *Сцинтилляционный детектор C4 10*. Детектор служит для улучшения электрон-адронного разделения при высоких энергиях посредством измерения энергосодержания ливней, вышедших за пределы калориметра («утечки»).

6. *Нейтронный детектор 11*. Детектор служит для улучшения электрон-адронного разделения при высоких энергиях посредством измерения числа нейтронов, рождённых при взаимодействии в калориметре.

В *Главе 4* приводятся разработанные методы выделения полезных событий.

Для достижения цели работы – выделения антипротонов и поиска антиядер дейтерия и гелия – разработан алгоритм, состоящий из следующих процедур: 1) предварительный отбор событий; 2) определение типа частиц и подавление фоновых событий; 3) определение и проверка знака заряда.

При выделении событий, прошедших в апертуре прибора, для которых можно измерить жесткость и скорость, применяется отбор с использованием информации от систем антисовпадений и времени-пролёта, который также позволяет полностью исключить из анализа частицы альбедо. Чтобы удалить из анализа события с рассеяниями на большие углы в плоскостях трекера, которые приводят к ошибке при восстановлении траектории, используются дополнительные критерии отбора: 1) проверка совпадения измеренных и восстановленных координат в трековой системе; 2) проверка совпадения координат, измеренных верхними счётчиками время-пролётной системы и восстановленными независимо трековой системой; 3) проверка прохождения восстановленной по трекеру траектории через стрип первой плоскости калориметра с ненулевым энергосодержанием.

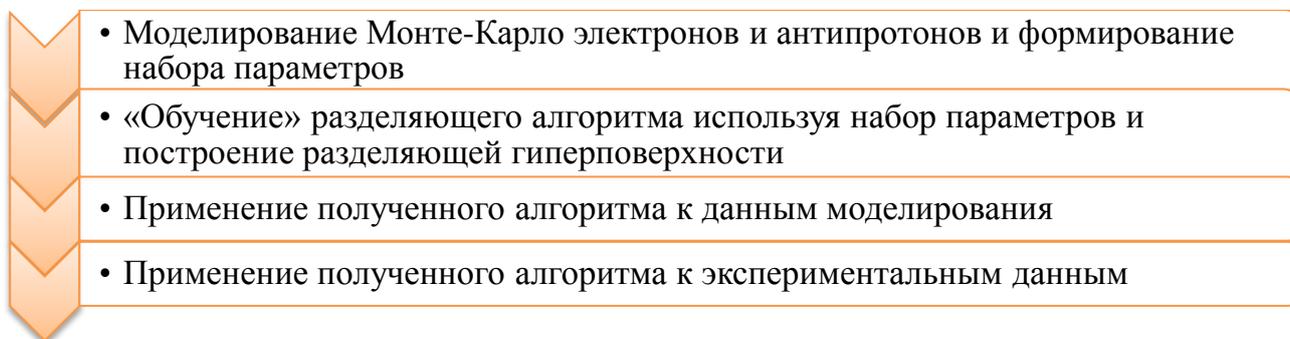
Модуль заряда определяется с использованием зависимости ионизационных потерь в детекторах трекера (среднее значение по всем сработавшим плоскостям) от измеренной жесткости. Построен отбор, при котором вкладом гелия в протоны и тяжёлых ядер в гелий можно пренебречь, а вклад протонов в гелий уменьшается от

10^{-4} до 10^{-5} с ростом энергии. Т.к. поток антипротонов/электронов в сотни раз меньше потока протонов, вероятность имитации антигелия ими пренебрежимо мала.

Выделение протонов и антипротонов. Для подавления электронов, доля которых в космических лучах на 2-3 порядка превышает долю антипротонов, разработаны критерии отбора, основанные на информации от калориметра. В основу разделения частиц положен анализ различий в топологическом развитии адронных и электромагнитных ливней, которые обусловлены разной природой их образования. Для этого введены параметры, характеризующие продольный и поперечный профили, начальную точку взаимодействия и энерговыведения в разных частях ливня.

В данной диссертационной работе одновременно с обычными методами дискриминации частиц для увеличения статистики использована математическая модель классификации данных, являющаяся частью алгоритмов MVA (англ. Multivariate analysis – многомерный анализ) [19]. Классификация — процесс группировки объектов исследования или наблюдения в соответствии с их общими признаками. Постановка задачи: имеется множество объектов, разделённых некоторым образом на классы; задано конечное множество объектов, для которых известно к каким классам они относятся (*обучающая выборка*); классовая принадлежность остальных объектов не известна. Требуется построить алгоритм, способный классифицировать произвольный объект из исходного множества. В работе обучающая выборка получена при помощи моделирования Монте-Карло прохождения электронов и антипротонов через спектрометр.

Последовательность построения алгоритма показана ниже:

- 
- Моделирование Монте-Карло электронов и антипротонов и формирование набора параметров
 - «Обучение» разделяющего алгоритма используя набор параметров и построение разделяющей гиперповерхности
 - Применение полученного алгоритма к данным моделирования
 - Применение полученного алгоритма к экспериментальным данным

Для моделирования в коллаборации «ПАМЕЛА» разработана специальная программа на основе пакета GEANT 3.21 [20], которая воспроизводит характеристики

аппаратуры, полученные в калибровках на ускорителе. Стабильность характеристик регулярно проверяется в полёте.

Обучающая выборка представляет собой совокупность значений каждого из используемых параметров, полученных из моделирования для электронов и антипротонов. В пространстве с размерностью, равной числу параметров, к обучающей выборке применяются стандартные математические классификаторы, встроенные в язык MatLab [21]. В результате построена гиперповерхность, разделяющая области электронов и антипротонов. При этом подавление электронов лучше 10^{-4} , их ожидаемая примесь не более 1-2%, а эффективность отбора антипротонов выше 90% во всем диапазоне энергий.

Другим источником имитации антипротонов являются π -мезоны, которые рождаются в элементах конструкции спутника, алюминиевом контейнере или счётчиках ВПС. Такие события исключаются базовыми критериями отбора, ограничением энерговыделения в сработавших полосах ВПС и ограничением общего числа срабатываний в трекаре, не использованных при восстановлении траектории. Примесь фона в конечной выборке не превосходит нескольких процентов.

Выделение дейтронов и антидейтронов проводится в диапазоне жёсткостей от 0.4 до 3 ГВ. Для выделения полезных событий на фоне электронов и π -мезонов использованы критерии, полученные в анализе антипротонов. Разделение протонов и дейтронов основано на различиях ионизационных потерь, измеряемых плоскостями трекара, счётчиками ВПС и двумя верхними плоскостями калориметра. Для создания критериев отбора полезных событий по этим параметрам, проводится моделирование Монте-Карло прохождения дейтронов и протонов через спектрометр. Полученная эффективность отбора дейтронов выше 95% при жёсткостях до 2 ГВ, с ростом энергии она уменьшается до 35% при 3 ГВ. Вероятность имитации антидейтрона антипротоном ниже 0.05% во всем диапазоне энергий.

Оценки фона при выделении антипротонов и антидейтронов также подтверждены экспериментальными массовыми распределениями конечных выборок.

С увеличением энергии возрастает радиус кривизны траектории в магнитном поле и энергетическое разрешение спектрометра ухудшается. В этом случае при восстановлении трека важную роль играют такие физические процессы, как рассеяние на малые углы в одной из внутренних плоскостей трекера или образование δ -частиц. Все это приводит к росту числа протонов с неверно определённым знаком кривизны траектории («спилловер»). Для проверки правильности восстановления знака заряда и получения измерений в области высоких энергий, в работе использованы дополнительные критерии: 1) сравнение величин жёсткостей, измеренных при помощи различных комбинаций точек на треке в магнитной трековой системе; 2) ограничение размеров кластеров вдоль трека и ограничение на число кластеров, не связанных с треком; 3) отбор событий с модулем измеренной жесткости меньше в 3 раза максимально измеряемой (англ. MDR - Maximum Detectable Rigidity) для этого события [22]. Величина MDR определяется для каждого события с учетом магнитного поля, в котором отклонялась частица, размеров кластеров, числа точек на треке, расстояния между ними и т.п. Характерное значение энергии, до которой при данном условии можно проводить измерения антипротонов в эксперименте «ПАМЕЛА» 350-400 ГэВ.

Для восстановления энергетического спектра антипротонов определены эффективности отбора событий с использованием экспериментальных данных и моделирования методом Монте-Карло. Учтено изменение эффективности во времени. Для построения отношения потоков частиц и античастиц введены поправки на различные эффективности отбора, связанные с аннигиляцией античастиц в спектрометре. Для антипротонов и протонов поправки получены по данным моделирования; для антидейтронов и антигелия использованы данные о сечениях их взаимодействия из работы [23].

Выделение галактических космических лучей основано на теории Штёрмера. Орбита спутника позволяет проводить измерения потоков частиц под радиационным поясом, внутри радиационного пояса, а также первичного космического излучения. Для выделения галактической компоненты используется условие $R > k \cdot R_C$, где R –

абсолютная величина измеренной жёсткости для каждого события, а R_C – локальная жесткость геомагнитного обреза в месте его регистрации. Она вычисляется по координатам Мак-Илвайна, определенным из местоположения спутника в модели Norad [24] и модели магнитного поля Земли IGRF [25]. Выбранное значение $k=1.2$ позволяет надежно выделять галактическую компоненту космических лучей.

В главе 5 представлены полученные в данной работе результаты:

1. отношение потоков антипротонов и протонов, а также энергетический спектр антипротонов в первичном космическом излучении;
2. верхние пределы отношения потоков антидейтронов и дейтронов, а также отношения потоков антигелия и гелия в первичном космическом излучении.

1. В результате проведённых измерений получен поток антипротонов в диапазоне энергий от 60 МэВ до 180 ГэВ. Применение оптимизированных методов выделения событий и проверки знака заряда, разработанных в рамках диссертационной работы и рассмотренных в главе 4, позволило увеличить статистику антипротонов с ~1500 до ~2800 событий и получить результаты до энергии 350 ГэВ. В энергетических интервалах 60-150 МэВ и 180-350 ГэВ антипротонов не обнаружено и установлены верхние пределы на их потоки (90% ДВ).

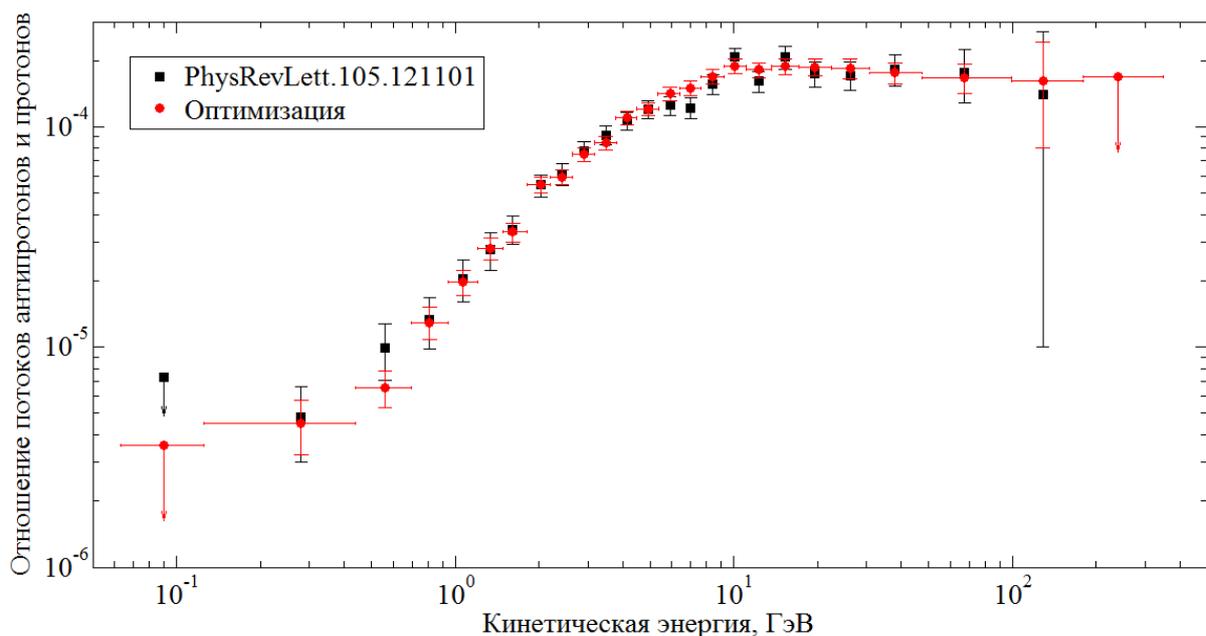


Рисунок 2. Измеренное отношение потоков антипротонов и протонов в эксперименте «ПАМЕЛА» до и после оптимизации выделения событий.

Сравнение результатов обработки до и после оптимизации показано на рисунке 2, на котором приведено измеренное отношение потоков антипротонов и протонов в зависимости от кинетической энергии.

Полученные в данной работе результаты на рисунке 3 сравниваются с предыдущими измерениями. Здесь же показаны теоретические расчеты в модели вторичного происхождения антипротонов в Галактике и плоской диффузии в межзвёздной среде [26] (сплошная линия) и предсказываемая неопределённость расчётного потока вторичных антипротонов, связанная с их рождением и диффузией в Галактике в работе [27] (пунктирные линии).

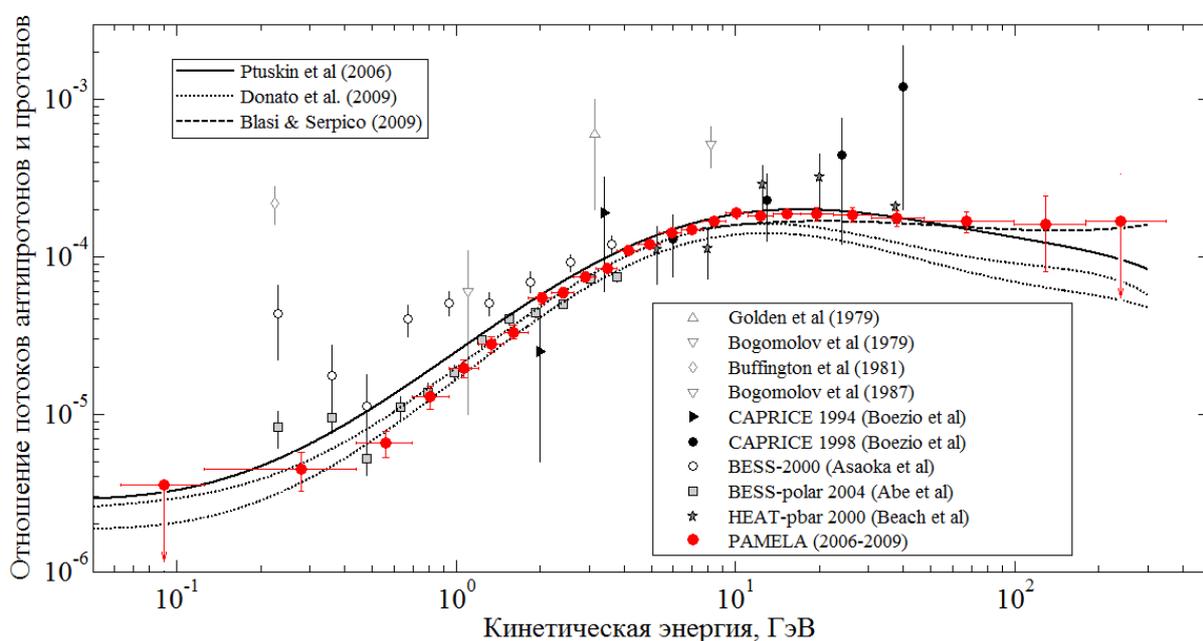


Рисунок 3. Измеренное отношение потоков антипротонов и протонов в первичных космических лучах в сравнении с другими измерениями и теоретическими моделями.

При энергиях ниже 3 ГВ наблюдается хорошее согласие с измерениями в эксперименте BESS [16]; в диапазоне энергий от 4 до 50 ГэВ полученные данные совпадают с экспериментальными результатами HEAT-pbar [28], но обладают лучшей статистической точностью; свыше 50 ГэВ результаты получены *впервые*.

При энергиях больше нескольких десятков ГэВ экспериментальные измерения находятся выше области неопределённости вторичного потока, вычисленного в работе [27]. В расчетах [29] введен дополнительный источник, связанный с рождением и ускорением антипротонов на фронтах ударных волн во взрывах

сверхновых. Эти расчеты позволяют описать полученные экспериментальные данные (штриховая линия).

Также существуют другие модели, в которых интерпретация экспериментальных данных не исключает существования дополнительных источников антипротонов. В частности, в работе [30] приводятся предсказания потока антипротонов от аннигиляции суперсимметричных частиц и состояний Калуцы-Кляйна. Они показаны пунктирной и штриховой линиями на рисунке 4. Сплошные линии соответствуют неопределённости расчётного потока вторичных антипротонов [30]. При энергиях свыше 30 ГэВ полученные в работе экспериментальные данные не противоречат аннигиляции частиц тёмной материи с массой несколько ТэВ.

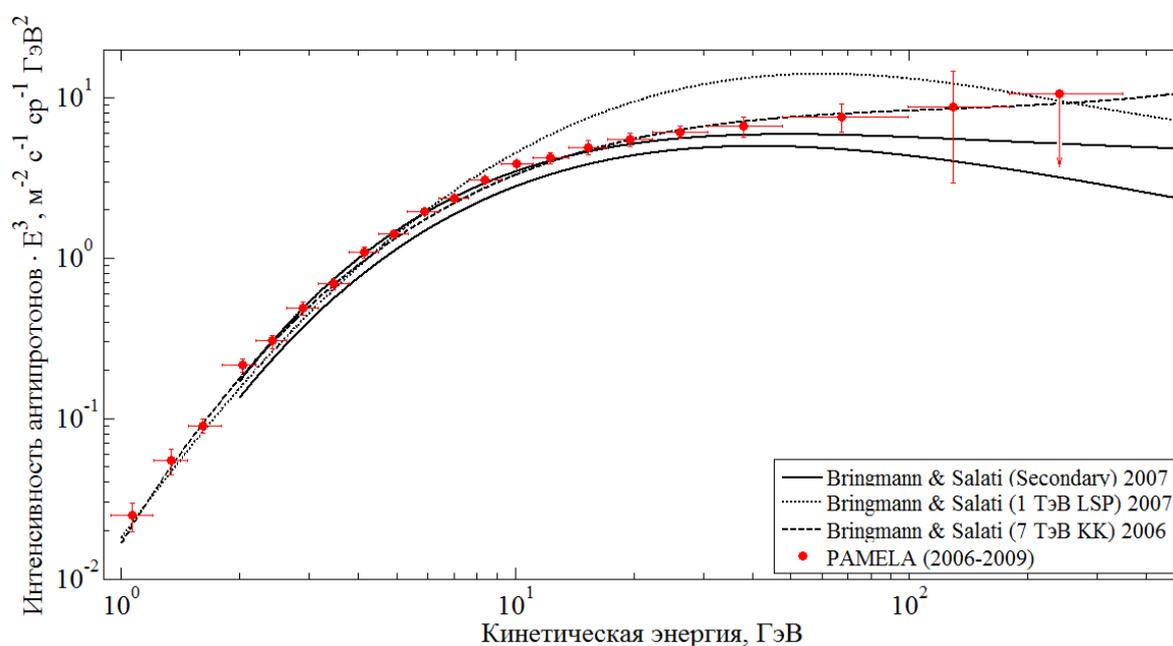


Рисунок 4. Измеренная интенсивность антипротонов первичного космического излучения.

Для уточнения модели распространения антипротонов в Галактике, на рисунке 5 показан измеренный дифференциальный энергетический спектр антипротонов в сравнении с результатами предыдущих экспериментов и теоретическими расчетами в различных вариантах диффузионной модели. Сплошной, пунктирной и штриховой линиями показаны случаи плоской диффузии, диффузии с учётом стохастического доускорения и диффузии с учётом доускорения и дампинга, т.е. изменения коэффициента диффузии в среде из-за воздействия на неё космических лучей [26].

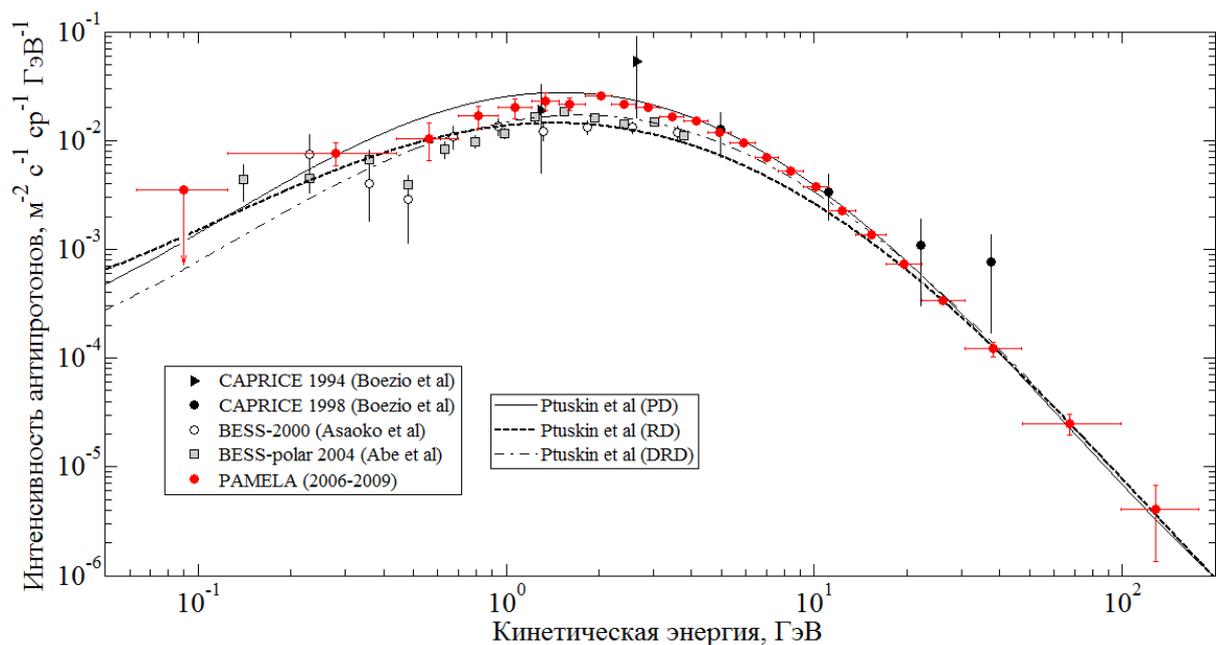


Рисунок 5. Измеренная интенсивность антипротонов первичного космического излучения.

При энергиях менее 200 МэВ отличие может быть связано с эффектом солнечной модуляции, в то время как выше этого значения получено совпадение с моделью плоской диффузии.

Благодаря статистической достоверности и широкому энергетическому диапазону, результаты эксперимента «ПАМЕЛА», представленные в данной диссертационной работе, могут быть использованы для уточнения моделей генерации и распространения космических лучей в Галактике, а также изучения природы гипотетических частиц тёмной материи.

2. В результате поиска антидейтронов на основе разработанных методов выделено ~275.000 дейтронов с положительным зарядом в диапазоне энергий от 50 до 830 МэВ/нуклон. Это позволило установить верхние пределы на отношение потоков антидейтронов и дейтронов и на поток антидейтронов в

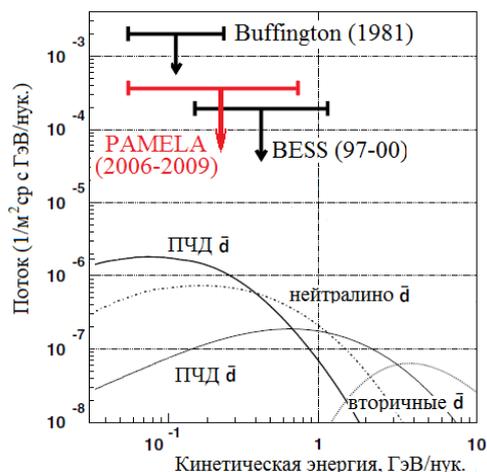


Рисунок 6. Верхний предел потока антидейтронов в первичных космических лучах

первичных космических лучах. С 95% доверительной вероятностью они равны $1.1 \cdot 10^{-5}$ и $3.8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1} (\text{ГэВ/нуклон})^{-1}$. На рисунке 6 представлено сравнение результатов предыдущих измерений с данными этой работы. Все существующие экспериментальные данные, находятся на несколько порядков выше теоретических предсказаний. Однако, знание этой величины позволяет надёжно исключить присутствие антидейтронов в космических лучах на этом уровне.

После проведенного анализа событий с зарядом 2, в интервале жесткостей от 0.6 ГВ до 600 ГВ отобрано около 6.330.000 частиц, все они имеют положительную жесткость. Установлен верхний предел отношения \overline{He}/He , который равен $4.7 \cdot 10^{-7}$ в диапазоне жесткостей 0.6 - 600 ГВ. На рисунке 7 приведено сравнении с результатами других экспериментов.

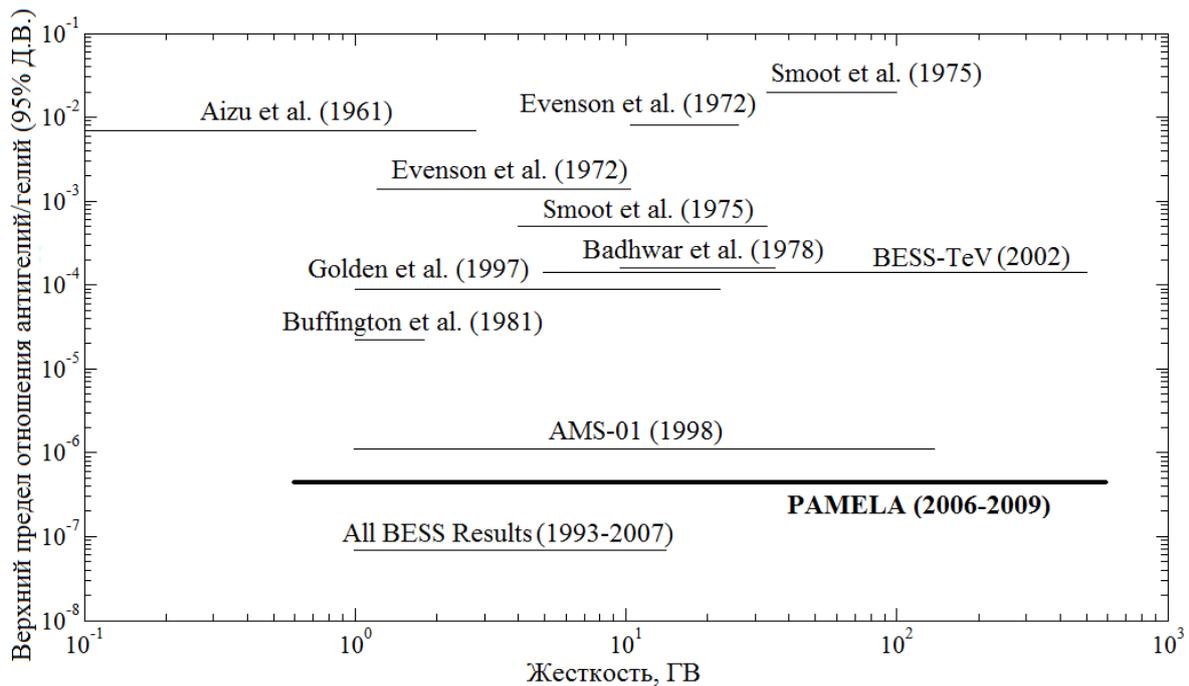


Рисунок 7. Верхний предел отношения \overline{He}/He (95% Д.В.)

При высоких энергиях полученный верхний предел является наиболее низким. Это важный энергетический диапазон для поиска антигелия, т.к. поток антиядер при низких энергиях ослабляется в Галактике и Солнечной системе из-за малой длины свободного пробега и большого сечения аннигиляции. Кроме того, полученный результат может быть важен для модели существования шарового скопления антизвёзд в Галактике, сохранившейся с момента Большого взрыва [31].

Другим интересным результатом, основанном на поиске антигелия, является поиск аномального антигелия. Его существование возможно в моделях 4-го семейства кварков и лептонов или техницвета [32]. Согласно этим моделям, стабильные частицы с зарядом -2 и массой несколько ТэВ образовывали нейтральную связанную систему с гелием на ранних стадиях развития Вселенной. В дальнейшем, из-за малой энергии связи, эта система разрушалась космическими лучами, инжектируя в межзвёздную среду частицы аномального антигелия. Установленный верхний предел на его поток позволяет изучать параметры перечисленных моделей.

В ходе работы получены следующие основные результаты:

1. На основании обработки и анализа экспериментальных данных спектрометра «ПАМЕЛА» получены следующие результаты:

1.1. Дифференциальный энергетический спектр антипротонов и отношение потоков антипротонов и протонов в широком диапазоне энергий от 60 МэВ до 350 ГэВ в первичном космическом излучении. Показано, что обе энергетические зависимости можно описать с помощью модели вторичного происхождения античастиц в Галактике; однако, не исключено появление дополнительного источника антипротонов.

1.2. Установлен верхний предел отношения потоков антидейтронов и дейтронов, который в диапазоне энергий 0.05-0.83 ГэВ/нуклон равен $1.1 \cdot 10^{-5}$ (с доверительной вероятностью 95%).

1.3. Установлен верхний предел отношения потоков антигелия и гелия в первичных космических лучах, который равен $4.7 \cdot 10^{-7}$ (с доверительной вероятностью 95%) в диапазоне жёсткостей от 0.6 до 600 ГВ, и является наиболее низким при жёсткостях свыше 14 ГВ.

2. Разработан метод идентификации антипротонов по данным спектрометра «ПАМЕЛА», основанный на математической модели классификации данных. Показано, что примесь фоновых событий в окончательную выборку не более 1-2%. Определены физические характеристики прибора с использованием экспериментальной информации и расчетов методом Монте-Карло.

3. Разработан метод исключения из анализа событий с рассеяниями во внутренних детекторах трековой системы, приводящими к неправильному измерению кривизны траектории и знака заряда.

Основное содержание диссертации было опубликовано в следующих работах

1) O. Adriani, G. Barbarino, G.A. Bazilevskaya, ... A.G. Mayorov et.al, Measurements of quasi-trapped electron and positron fluxes with PAMELA, Journal of Geophysical Research, V. 114, A12218, 2009.

2) O. Adriani, G. Barbarino, G.A. Bazilevskaya, ... A.G. Mayorov et.al, PAMELA Results on the Cosmic-Ray Antiproton Flux from 60 MeV to 180 GeV in Kinetic Energy, Phys. Rev. Lett., V. 105, I. 121101, 2010.

3) M.Yu. Khlopov, A.G. Mayorov, E.Yu. Soldatov, Puzzles of Dark Matter in the Light of Dark Atoms, Journal of Physics: Conference Series, V. 309, I. 012013, 2011.

4) O. Adriani, G. Barbarino, G.A. Bazilevskaya, ... A.G. Mayorov et.al, The cosmic-ray electron flux measured by the PAMELA experiment between 1 and 625 GeV, Phys. Rev. Letters, V. 106, I. 201101, 2011.

5) O. Adriani, G. Barbarino, G.A. Bazilevskaya, ... A.G. Mayorov et.al, Observations of the December 13 and 14, 2006, Solar Particle Events in the 80MeV/n - 3 GeV/n range from space with PAMELA detector, Accepted for publication on Astrophysical Journal, arXiv:1107.4519v1.

6) O. Adriani, G. Barbarino, G.A. Bazilevskaya, ... A.G. Mayorov et.al, The discovery of geomagnetically trapped cosmic ray antiprotons, ApJ, V. 737, L29, 2011.

7) M.Yu. Khlopov, A.G. Mayorov, E.Yu. Soldatov, Composite Dark Matter and Puzzles of Dark Matter Searches, Int.J.Mod.Phys.D, V. 19, PP. 1385-1395, 2010.

8) O. Adriani, G. Barbarino, G.A. Bazilevskaya, ... A.G. Mayorov et.al, Measurements of Cosmic-ray Proton and Helium Spectra, Science, V. 332, I. 69, 2011.

9) А.В. Карелин, О. Адриани, Г.А. Базилевская, ... А.Г. Майоров и др., Измерение потоков протонов и ядер гелия высоких энергий, Известия РАН, Серия Физическая, том 75, № 3, с. 356–359, 2011.

10) В. В. Михайлов, О. Адриани, Г.А. Базилевская, ... А.Г. Майоров и др., Измерение потоков электронов и позитронов первичных космических лучей в эксперименте “ПАМЕЛА”, Изв. РАН Сер. Физ., Т.75, № 3, с. 345–347, 2011.

11) А.Г. Майоров, О. Адриани, Г.А. Базилевская и др., Поиск антигелия в космических лучах по данным эксперимента “ПАМЕЛА”, Изв. РАН Сер. Физ., том 75, № 3, с. 362–364, 2011.

12) А.Г. Майоров, О. Адриани, Г.А. Базилевская и др., Солнечная модуляция спектров протонов и ядер гелия в эксперименте “ПАМЕЛА”, Изв. РАН Сер. Физ., том 75, № 6, с. 846–848, 2011.

13) А.Г. Майоров, А.М. Гальпер, и др., Верхний предел на поток антигелия в первичных космических лучах, Письма в ЖЭТФ, Т. 93, Вып. 11, с. 704-708, 2011.

14) M.Yu. Khlopov, A.G. Mayorov, E.Yu. Soldatov, Composite Dark Matter: solving the puzzles of underground experiments?, Proceedings to the 11th Workshop “What Comes Beyond the Standard Models”, V. 2, N. 2, PP. 24-43, 2008.

15) M.Yu. Khlopov, A.G. Mayorov, E.Yu. Soldatov, Low energy binding of composite dark matter with nuclei as a solution for the puzzles of dark matter searches, Proceedings to the 12th Workshop “What Comes Beyond the Standard Models”, Bled Workshops in Physics V. 10, N. 2, PP. 79-94, 2009.

16) А.М. Гальпер, О. Адриани, Г.А. Базилевская, ... А.Г. Майоров и др., Аномальный эффект эксперимента «ПАМЕЛА» – шаг к пониманию природы темной материи, Научная сессия МИФИ, сборник научных трудов, т.1, стр. 94-99, 2009.

17) В.В. Михайлов, О. Адриани, ... А.Г. Майоров и др., Измерения потоков ядер гелия первичных космических лучей от 100 МэВ до 100 ГэВ в эксперименте ПАМЕЛА, Научная сессия МИФИ, сборник научных трудов, т.4, стр. 61-64, 2009.

18) Л.А. Гришанцева, О. Адриани, Г.А. Базилевская, ... А.Г. Майоров и др., Высокоэнергичные электроны и позитроны в околоземном космическом пространстве, Научная сессия МИФИ, сборник научных трудов, т.4, стр. 65-68, 2009.

19) M.Yu. Khlopov, A.G. Mayorov, E.Yu. Soldatov, Dark Atoms of the Universe: towards OHe nuclear physics, Proceedings to the 13th Workshop “What Comes Beyond the Standard Models”, Bled Workshops in Physics V. 11, N. 2, PP. 73-88, 2010.

20) M.Yu. Khlopov, A.G. Mayorov, E.Yu. Soldatov, Puzzles of Dark Matter - More Light on Dark Atoms?, arXiv:1011.4587v1.

21) M.Yu. Khlopov, A.G. Mayorov, E.Yu. Soldatov, The dark atoms of dark matter, Prespacetime Journal, V. 1, I. 9, pp. 1403-1417, 2010.

22) A.M. Galper, O. Adriani, G. Barbarino, ... A.G. Mayorov et.al, Three years of the PAMELA mission, Proceedings of the ICRC31, Invited, Rapporteur and Highlight Paperes, PP. 199-206, 2010.

23) В.В. Михайлов, Л.А. Гришанцева, С.В. Борисов, ... А.Г. Майоров и др., Спектры электронов галактических космических лучей с энергией до 100 ГэВ по данным эксперимента «ПАМЕЛА», Научная сессия МИФИ, сборник научных трудов, т.4, стр. 99-102, 2010.

24) А.М. Гальпер, А.Г. Майоров от коллаборации «ПАМЕЛА», Поиск антигелия в эксперименте «ПАМЕЛА», Научная сессия МИФИ, сборник научных трудов, т.4, стр. 107-110, 2010.

25) К.М. Белоцкий, А.Г. Майоров, М.Ю. Хлопов, Заряженные частицы скрытой массы в космических лучах, Научная сессия МИФИ, сборник научных трудов, т.4, стр. 127-130, 2010.

26) С.В. Борисов, С.А. Воронов, А.М. Гальпер, ... А.Г. Майоров и др., Спектр протонов высоких энергий космических лучей, Краткие сообщения по физике ФИАН, №3, с. 15-27, 2011.

27) Е.В. Аниканова, К.М. Белоцкий, А.Г. Майоров и др., Шаровое скопление антизвёзд как источник антигелия в Галактике, Труды 8-й Курчатовской молодёжной школы, 363-367, 2011.

Список цитируемой литературы

1. Aizu H., et al. // Physical Review, V. 121, № 4, 1961. – P. 1206-1218.
2. Вернов С.Н., и др. // Докл. АН СССР, Т.68, 1949. - С.253-255.
3. Ivanova N. S., et al. // Cosmic Research, V. 6, 1968. - P.69.
4. Evenson P. // The Astrophysical Journal, V. 176, 1972. - P. 797-808.
5. Buffington, A., et al. // Nature, V. 236, Is. 5346, 1972. - P. 335-338.
6. Smoot G.F., et al. // Physical Review Letters, V.35, №4, 1975. – P. 258-261.

7. Golden R.L., et al. // The Astrophysical Journal, V. 192, 1974. - P. 747-751.
8. Bogomolov E.A., et al. // ICRC, 1979.
9. Golden R.L., et al. // Astrophysical Letters, V.24, 1984. – P. 75-83.
10. Salamon M.H., et al. // The Astrophysical Journal, V. 349, 1990. - P. 78-90.
11. Moats A., et al. // ICRC, 1990; Streitmatter R.E., et al. // ICRC, 1990.
12. Hof M., et al. // The Astrophysical Journal, V. 467, 1996. - P. L33-L36.
13. Mitchell J.W., et al. // Physical Review Letters, V.76, №17, 1996. – P. 3057-3060.
14. Boezio M., et al. // The Astrophysical Journal, V. 487, 1997. - P. 415-423.
15. Boezio M., et al. // The Astrophysical Journal, V. 561, 2001. - P. 787-799.
16. Orito S., et al. // Physical Review Letters, V.84, №6, 2000. – P. 1078-1081.
17. Aguilar M., et al. // Physics Reports, V. 366, 2002. – P. 331-405.
18. Picozza P., et al. // Astroparticle Physics, V. 27, 2007. – P. 296-315.
19. Krzanowski W.J. // New York: Oxford University Press, 1988.
20. Brun R., et al. // Detector description and simulation tool, CERN program library, 1994.
21. <http://www.mathworks.com/>
22. Группен К., Детекторы элементарных частиц. - Новосибирск: Сибирский хронограф, 1999.
23. Moiseev A., et al. // Astroparticle Phys., V. 6, 1997. – P. 379-386.
24. <http://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/models/geomagnetic/igrf/>
25. <https://www.space-track.org/>
26. Ptuskin V.S., et al. // Astrophys. J., V. 642, 2006. – P. 902.
27. Donato F., et al. // Phys. Rev. Lett., V. 102, 2009. – P. 071301.
28. Beach A.S., et al. // Phys. Rev. Lett., V.87, №27, 2001. – P. 271101-(1-4).
29. Blasi P., Serpico P.D. // Phys. Rev. Lett., V. 103, 2009. – P. 081103.
30. Bringmann T., et al. // arXiv:astro-ph/0506219v2.22(2005) & 0612514v2.2(2007).
31. Khlopov M.Y. // arXiv:hep-ph/0003285v1(2000).
32. Khlopov M.Y., Kouvaris C. // Phys. Rev. D, V. 77, 2008. – P. 065002.