

На правах рукописи

Борисов Станислав Владимирович

**ЭЛЕКТРОНЫ И ПОЗИТРОНЫ С ЭНЕРГИЕЙ БОЛЕЕ 10^{10} ЭВ В
ПЕРВИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ**

01.04.16 – Физика ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

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

Автор:

Москва 2010

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ».

Научный руководитель:

Доктор физико-математических наук, профессор Воронов Сергей Александрович (НИЯУ МИФИ)

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, профессор Мерзон Габриэль Израилевич (ФИАН)

Доктор физико-математических наук, профессор Охлопков Виктор Петрович (НИИЯФ МГУ)

Ведущая организация: Институт космических исследований РАН

Защита состоится « 16 » июня 2010 г. в 16 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.07 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 « 26 » апреля 2010 г.

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

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.ф.-м.н., профессор



С.Е. Улин

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Исследование космических лучей (КЛ) ведётся уже почти 100 лет, но и сегодня остаётся достаточно много нерешённых проблем. Одно из важнейших направлений исследований КЛ – изучение потоков электронов и позитронов. Цель исследований в этом направлении – изучение природы этих потоков. Один из естественных механизмов образования позитронов – реакции между высокоэнергичными частицами космических лучей и межзвездным веществом. Другой возможный источник – это так называемая «темная» материя, которая, как предполагается, подвержена процессам с генерацией электронно-позитронных пар. Третий возможный источник античастиц (позитронов) – это нейтронные звёзды, пульсары и сверхновые. Поэтому, измерив спектр электронов и позитронов в космических лучах в области энергий свыше 100 ГэВ, можно будет сделать вывод о природе наблюдаемого потока.

Цель работы

Целью данной работы является создание методики измерения потока электронов и позитронов в эксперименте ПАМЕЛА и исследование спектра электронов и позитронов галактических космических лучей с энергиями более 10^{10} эВ.

Научная новизна и значимость работы

Научная значимость работы.

Разработана методика выделения электронов в позиционно-чувствительном калориметре на фоне адронов. С помощью

разработанной методики получен суммарный спектр галактических электронов и позитронов в области энергий от 30 ГэВ до 800 ГэВ по данным измерений спектрометра ПАМЕЛА.

Новизна работы.

Впервые разработана методика выделения электронов на фоне адронов по картине ливня в координатно-чувствительном калориметре спектрометра ПАМЕЛА, при этом доля примесных адронов составляет несколько процентов.

Впервые измерен суммарный спектр галактических электронов и позитронов в области энергий от 30 ГэВ до 800 ГэВ, где до настоящего времени не было измерений, проводившихся в космическом пространстве.

Достоверность

Достоверность полученных результатов подтверждается проверками расчётов Монте-Карло с использованием экспериментальных данных. Также было проведено сравнение измеренного спектра в области низких энергий со спектрами электронов и позитронов, измеренными в эксперименте ПАМЕЛА, но с использованием других методик, которое показало отличное совпадение.

Практическая ценность работы

Результаты данной работы могут быть использованы для уточнения существующих моделей генерации и распространения космических лучей в Галактике. Было также получено указание на наличие дополнительного источника заряженных лептонов в Галактике, который, возможно, связан с проявлением частиц тёмной материи.

На защиту выносятся результаты:

1. Методика выделения электронов на фоне адронов по картине ливня в позиционно-чувствительном калориметре.
2. Суммарный электронно-позитронный спектр в диапазоне энергий от 30 ГэВ до 800 ГэВ.

Вклад автора

Выносимые на защиту результаты были получены автором лично. Автором разработана, оптимизирована и всесторонне проверена методика выделения электронной компоненты в эксперименте ПАМЕЛА по данным позиционно-чувствительного электромагнитного калориметра, нейтронного детектора и сцинтилляционных детекторов. С помощью разработанной методики был получен суммарный электронно-позитронный спектр, который был проанализирован с использованием численных расчётов спектра галактических космических лучей, выполненных с помощью программы GALPROP.

Апробация работы

Результаты, полученные в ходе работы над диссертацией, обсуждались на международных научных семинарах и конференциях, а также совещаниях в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ», Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН, Научно-исследовательском институте ядерной физики им. Д.В. Скобельцина, Национальном институте ядерной физики Италии, а именно:

- 1) Доклад на конференции в рамках Международного Авиа-

Космического Салона в г. Жуковском в 2007 году;

- 2) Доклады на Научной сессии МИФИ: 2 в 2008 году, 2 в 2009 году, 4 – в 2010 году;
- 3) Доклады на Совещании по обработке данных коллаборации ПАМЕЛА: 1 в феврале 2008 года (г. Бари, Италия), 1 в июне 2008 года (г. Санкт-Петербург), 2 в октябре 2008 года (г. Рим, Италия), 2 в ноябре 2008 года (Капри, Италия), 1 в октябре 2009 года (г. Линдау, Германия);
- 4) Доклад на Всероссийской конференции по космическим лучам 2008; Доклад на 31-й Международной конференции по космическим лучам, Лодзь, Польша, июль 2009;
- 5) Доклад на конференции XLIVth Rencontres de Moriond session devoted to Electroweak Interactions and Unified Theories, La Thuile. Франция, 2009;
- 6) Доклад на 34-й Международной конференции по физике высоких энергий (ICHEP08), Филадельфия, (США);
- 7) Семинары в Физическом Институте им. П.Н. Лебедева РАН в феврале и марте 2010 года;
- 8) Семинар в Научно-исследовательском Институте Ядерной Физики им. Д.В. Скобельцина, 2010.

Структура диссертации

Диссертация изложена на 164 страницах, включает в себя 120 иллюстраций, 15 таблиц; состоит из 10 глав, в том числе введения и заключения. Работа содержит список литературы из 94 наименований и 2 приложения.

В **первой главе** обосновывается актуальность темы, излагаются теоретические аспекты исследования космических лучей и, в частности,

электронов и позитронов, формулируется задача исследования.

Во **второй главе** описываются основные вехи истории экспериментального исследования космических лучей как с помощью спектрометрических, так и калориметрических экспериментов, проводившихся на высотных аэростатах и спутниках. Приводится описание первых экспериментов по прямому измерению космических лучей, таких как спектрометр В.А. Романова, Р. Голдена, калориметрические эксперименты Н.Л. Григорова на спутниках «Протон». Описывается также современное состояние исследований на примере таких экспериментов как BESS, IMAX, Мария-2, АТІС.

В **третьей главе** приводится описание эксперимента ПАМЕЛА. Магнитный спектрометр ПАМЕЛА был создан с целью проведения прецизионных измерений потоков частиц в околоземном космическом пространстве. Научными задачами магнитного спектрометра ПАМЕЛА являются измерение спектра антипротонов, позитронов, ядер, протонов, электронов в широком диапазоне энергий, а также изучение солнечной модуляции потока космических лучей за довольно продолжительное время. Измерения спектрометра ПАМЕЛА могут помочь найти «темную» материю и антивещество во Вселенной, изучить механизмы ускорения и распространения КЛ.

Измерения проводятся на околоземной орбите (высота 350 – 650 км, наклонение 70°), продолжительность измерений составляет более 3 лет, и они продолжаются по сегодняшний день, что намного дольше, чем в баллонных экспериментах.

Задачи эксперимента:

- измерение спектра антипротонов и позитронов при помощи магнитного спектрометра в энергетическом диапазоне 0.08 – 150 ГэВ;
- измерение спектра электронов при помощи магнитного спектрометра до энергии 200 ГэВ;

- измерение суммарного спектра электронов и позитронов с помощью калориметра до энергий ~ 1 ТэВ;
- изучение временного поведения спектров частиц, испускаемых при вспышках на Солнце.

Технические характеристики спектрометра:

- геометрический фактор $21.6 \text{ см}^2 \text{ср}$ для высокоэнергичных частиц;
- угловая апертура $19^\circ \times 16^\circ$;
- точность измерения координаты трекером: 4 мкм в проекции отклонения (X) и 15 мкм в Y;
- мёртвое время 5 мс для одиночной частицы;
- разрешающее время схемы совпадений 110 нс;
- полная масса 470 кг;
- максимальная потребляемая мощность 355 Вт;
- габариты прибора $123 \times 89 \times 91$ см.

Схематическое изображение спектрометра ПАМЕЛА приведено на рисунке 1. Состав и функционирование прибора подробно описаны в работе [1].

В **четвёртой главе** приводится описание структуры приёма и первичной обработки информации эксперимента ПАМЕЛА. Так как объём передаваемой информации очень велик (примерно 15 Гб в сутки), то потребовалось создание автоматизированной системы приёма и анализа данных. Такая система была организована в Наземном Комплексе ПАМЕЛА в Научном Центре Оперативного Мониторинга Земли (НЦ ОМЗ, Москва), где находится центр приёма данных и управления КА «Ресурс ДК1». Подробно описывается программное обеспечение как первичной, так и научной обработки информации. Необходимость создания системы автоматизированной обработки информации была обусловлена очень большими её объёмами (на сегодняшний день накоплено около 20 Тбайт информации о $\sim 10^9$ событий).

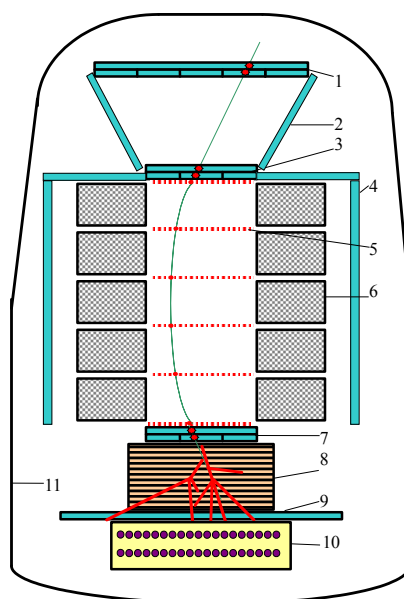


Рис. 1 Схематическое изображение спектрометра ПАМЕЛА.

- 1,3,7- времяпролетная система;
- 2- система антисовпадений;
- 4- сцинтилляционные охранные детекторы;
- 5- полупроводниковый стриповый трекер (шесть двойных слоев);
- 6- магнитная система (пять секций);
- 8- полупроводниковый стриповый позиционно-чувствительный калориметр;
- 9- детектор C4;
- 10- нейтронный детектор НД;
- 11- стенки контейнера.

В пятой главе приводится обзор существующих методов разделения электронной и адронной компонент в экспериментах по исследованию космических лучей, основанных как на магнитном анализе, так и по данным калориметра. Делается вывод о достижимых коэффициентах режекции при независимом использовании калориметра или при комбинации калориметра с такими приборами как магнитный спектрометр, детектор переходного излучения. А именно, что совместное использование таких приборов как магнитный спектрометр и калориметр даёт больший коэффициент режекции протонов, также позволяет отдельно регистрировать как электроны, так и позитроны, но имеет, в случае измерения спектра в эксперименте ПАМЕЛА, ограничение по энергии, которое не позволяет добраться до области энергий, интересной с точки зрения физики – порядка 1 ТэВ – где, как ожидается, в спектре электронов и позитронов может быть сигнатура аннигиляции частиц

«тёмной» материи или таких астрофизических процессов, как взрывы сверхновых или рождение электронно-позитронных пар в пульсарах.

Следует отметить, что ПАМЕЛА – это единственный прибор, который, обладая достаточно толстым калориметром (16.3 рад. длины), проводит измерения в околоземном космическом пространстве на борту ИСЗ. Таким образом, измерение спектра электронов и позитронов с помощью калориметра в эксперименте ПАМЕЛА представляет большой научный интерес, как с точки зрения получения новых знаний о спектре электронов и позитронов в интересной с точки зрения физики области энергий, так и с точки зрения сравнения результата с немногочисленными и разрозненными данными других экспериментов по измерению электронов высоких энергий.

В **шестой главе** приводится подробное описание методики разделения адронной и электронной компонент по данным позиционно-чувствительного калориметра спектрометра ПАМЕЛА. Методика была разработана на основе расчётов Монте-Карло в рамках модели, основанной на пакете физического моделирования GEANT3, полностью воспроизводящей геометрию спектрометра ПАМЕЛА с учётом приборных функций детекторов и электроники. Методика основана, прежде всего, на использовании калориметра спектрометра ПАМЕЛА. В методику были добавлены некоторые критерии отбора событий с использованием нейтронного детектора и время-пролётной системы, которые повысили надёжность отбора электронов и позитронов. Подробно описывается каждый параметр, выбор границ отбора, эволюция методики до финальной версии. Всего до применения финальной версии было разработано и применено к полётным данным 3 версии методики, каждая последующая из которых отличалась от предыдущей более высокой и стабильной эффективностью выделения электронов и позитронов и более высокой режекцией протонов. В окончательном

варианте методика позволяет выделять электроны с эффективностью около 50% практически во всём диапазоне измерений, за исключением начала энергетического диапазона (30 ГэВ – 100 ГэВ), где она плавно растёт от 30% до 50%. Оценка примеси протонов показала, что она составляет примерно 5% во всём диапазоне энергий.

В **седьмой главе** описывается процедура измерения энергии отобранных событий и алгоритм восстановления абсолютного потока электронов и позитронов. Измерение энергии отобранных событий производится по полному энергосодержанию в калориметре, которое зависит практически линейно от начальной энергии электронов. Энергетическое разрешение составляет величину не хуже 10 % во всём диапазоне энергий.

В **восьмой главе** приводятся оценки примеси протонов в спектре электронов, критерии отбора с использованием данных нейтронного детектора и время-пролётной системы. Производится оценка остаточной примеси адронов с помощью магнитного спектрометра. В отбор вводятся «доверительная» (fiducial) апертура: для построения суммарного электронно-позитронного спектра используются только события, в которых частицы проходят на некотором, определяемом пространственным разрешением методики восстановления траектории, расстоянии от стенок магнита. Приведен результат проверки правильности расчёта эффективности по полётным данным и временной стабильности работы детекторов.

При восстановлении спектра используется алгоритм восстановления спектра «unfolding» [2], учитывающий искажения истинного спектра частиц из-за конечного энергетического разрешения аппаратуры.

В **девятой главе** обсуждается полученный суммарный спектр электронов и позитронов как в сравнении с предыдущими версиями спектра, полученными с помощью менее совершенных вариантов

методики, так и в сравнении со спектрами электронов и позитронов, полученными в рамках двух других методик, используемых в эксперименте ПАМЕЛА. В пределах погрешностей все 3 спектра совпадают. Полученный результат также сравнивается с аналогичными измерениями, проводившимися в других экспериментах по исследованию космических лучей (смотри рисунок 2). Спектр близок к степенному, со средним показателем -3.15 ± 0.04 , и имеет особенность (избыточный поток) при энергиях 70 ГэВ – 200 ГэВ.

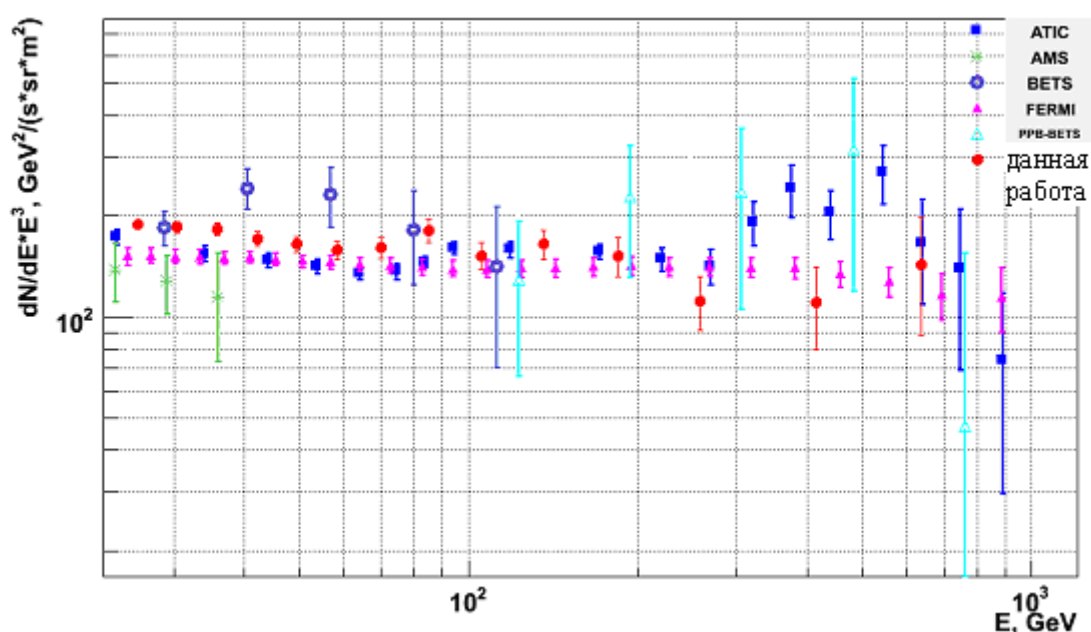


Рисунок 2. Спектры электронов и позитронов.

Был проведен численный расчёт суммарного электронно-позитронного спектра в околоземном космическом пространстве с помощью программы GALPROP [3], который выявил наличие в экспериментальных данных избыточного потока в области энергий 70 ГэВ – 200 ГэВ (рисунок 3). Расчёты с помощью данной программы электронно-позитронного спектра в околоземном космическом пространстве с учётом дополнительного источника позитронов и электронов показали, что наблюдаемый избыток, в частности, может быть связан с «тёмной» материей: в случае аннигиляции нейтралино, его масса

должна быть порядка 200 ГэВ, а в случае распада частиц Калуца-Кляйна [4], их масса должна быть около 400 ГэВ.

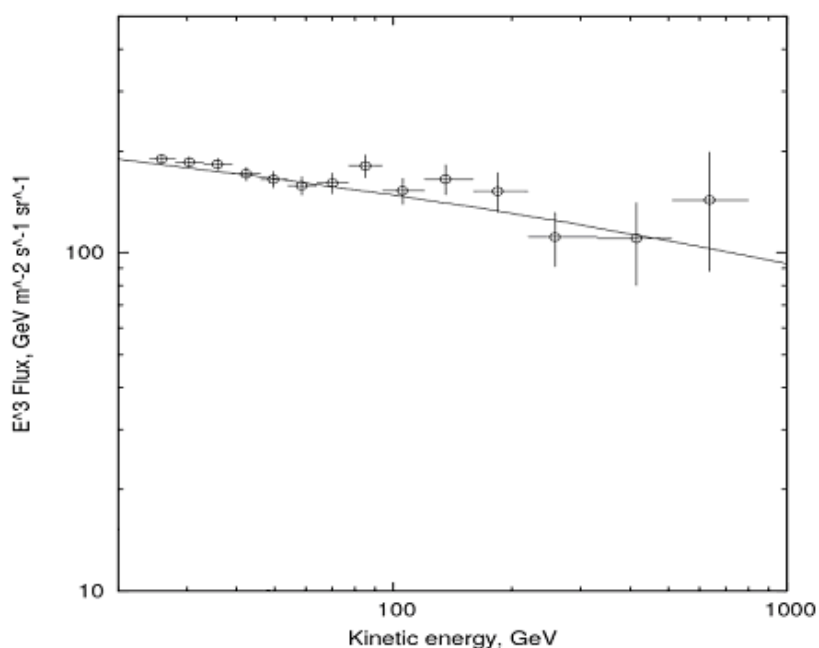


Рисунок 3. Измеренный суммарный электронно-позитронный спектр и результат модельного расчёта.

В заключении приводятся основные результаты работы:

1. Разработана методика выделения электронной компоненты на фоне адронной по параметрам ливня в электромагнитном позиционно-чувствительном калориметре с учётом данных нейтронного детектора и время-пролётной системы спектрометра ПАМЕЛА.
2. По экспериментальным данным была проверена стабильность работы детекторов и правильность моделирования их отклика на электроны и протоны.
3. С помощью разработанной методики по данным спектрометра ПАМЕЛА получен суммарный электронно-позитронный спектр в диапазоне энергий от 24 ГэВ до 800 ГэВ, который близок к степенному спектру со средним показателем -3.15 ± 0.04 , и имеет особенность в области энергий 70 – 200 ГэВ.
4. Проведены численные расчёты спектра электронов и позитронов в

околоземном космическом пространстве на базе рассмотрения только механизма вторичного рождения позитронов в межзвёздной среде, которые показали необходимость наличия дополнительного источника заряженных лептонов в Галактике для объяснения выявленной особенности.

5. Сравнение экспериментального электронно-позитронного спектра с расчётным в околоземном космическом пространстве с учётом дополнительного источника позитронов и электронов выявили возможность объяснения наблюдаемого избытка частицами «тёмной» материи, например, нейтралино с массой порядка 200 ГэВ или частиц Калуца-Кляйна с массой около 400 ГэВ. Возможно также объяснение вкладом от пульсаров и остатков сверхновых.

Публикации

Основные результаты были опубликованы в 12 печатных работах (и них 5 входит в перечень ВАК), а именно:

- 1) Борисов С.В., Воронов С.А. Отчёт по НИР «Обработка полётных данных спектрометра ПАМЕЛА», 2007, номер госрегистрации 01200302459;
- 2) Борисов С.В., Воронов С.А., Орси С. «Методика восстановления первичного импульса низкоэнергичного протона», Научная сессия МИФИ – 2008: Сборник научных трудов, М.: МИФИ, 2008, Т.-9, с. 161;
- 3) Борисов С.В., Воронов С.А. «Методика выделения электронных событий высоких энергий в магнитном спектрометре ПАМЕЛА», Научная сессия МИФИ – 2008: Сборник научных трудов, М.: МИФИ, 2008, Т.-9, с. 157;
- 4) Борисов С.В., Воронов С.А., Карелин А.В. «Разделение электронов и

протонов с помощью калориметра в экспериментах по прямому измерению состава и энергетических спектров космических лучей», М: УФН, 2009, том 179, №9, с. 931;

- 5) Борисов С.В., Воронов С.А., Карелин А.В. и др. «Определение характеристик каскада частиц, инициированного электронами и протонами, в позиционно-чувствительном калориметре», Письма в ЭЧАЯ, 2010, Т.7, №1 (157) с. 68;
- 6) С.В. Борисов, С.А. Воронов, А.М. Гальпер и др. «Измерение спектра электронов и позитронов высоких энергий с использованием калориметра спектрометра ПАМЕЛА», Инженерная физика, 2009, №7, с. 23;
- 7) O. Adriani.... S.V. Borisov et al. “Measurements of quasi-trapped electron and positron fluxes with PAMELA”, Journal Geophysical Research, v. 114, A12218, 2009;
- 8) M. Boezio.... S. Borisov et al. “PAMELA and indirect dark matter searches”, New Journal of Physics, Volume 11, October 2009, с.105023;
- 9) А.М. Гальпер, С.В. Борисов, С.А. Воронов и др. Аномальный эффект эксперимента ПАМЕЛА – важный шаг к пониманию природы темной материи. Научная сессия МИФИ. Сборник научных трудов, 2009, т. 1, с. 94;
- 10) В.В. Михайлов, С.В. Борисов, С.А. Воронов и др. Измерения потоков протонов и ядер гелия первичных космических лучей от 100 МэВ до 100 ГэВ в эксперименте ПАМЕЛА. Научная сессия МИФИ. Сборник научных трудов, 2009, т. 4, с.61;
- 11) Л.А. Гришанцева.... С.В. Борисов и др. Высокоэнергичные электроны и позитроны в околоземном космическом пространстве. Научная сессия МИФИ. Сборник научных трудов, 2009, т. 4, с.65;
- 12) С.В. Борисов, С.А. Воронов, А.М. Гальпер и др. Методика измерения Электрон-позитронного спектра с использованием

калориметра ПАМЕЛА. Научная сессия МИФИ. Сборник научных трудов, 2009, т. 4, с.69.

Литература

- [1] P. Picozza et al., “PAMELA – A Payload for Antimatter Matter Exploration and Light–nuclei Astrophysics”, 2007, ApJ, 27, 296.
- [2] G. D'Agostini, “A multidimensional unfolding method based on Bayes’ theorem”, NIM A, 1995, 362, 487.
- [3] Strong A.W., Moskalenko I.V. 2001, Adv. Space Res. 27, 717.
- [4] Baltz E.A. and Hooper D., 2005, JCAP, 7, 1.