

ОБЗОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

Поиски антивещества и тёмной материи и прецизионные исследования потоков космических лучей на Международной космической станции. Эксперимент АМС. Результаты четырёх лет экспозиции

Ю.В. Галактионов

Представлены результаты исследования космических лучей, полученные в эксперименте АМС в течение 2011–2015 годов на Международной космической станции. Исследованы спектры электронов и позитронов в области энергий порядка тераэлектронвольт. Выполнены прецизионные измерения потоков электронов и позитронов. Наблюдается рост доли позитронов по отношению к полному потоку лептонов с увеличением энергии частиц. Исследованы спектры протонов и ядер гелия. Представлен обзор теоретических моделей, дающих возможные объяснения наблюдаемых эффектов.

Ключевые слова: космос, орбита, эксперимент, космические лучи, позитроны, тёмная материя, протоны, установка, высокие энергии

PACS numbers: 13.85.Tr, 14.60.–z, 29.30.–h, 75.50.Ww, 95.30.–k,
95.55.–n, 96.50.S–, 97.60.–s, 98.58.Mj, 98.70.Sa

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2016.03.037764>

Содержание

1. Введение (45).
 - 1.1. Поиск антиядер. 1.2. Поиск тёмной материи. 1.3. Спектры космических лучей.
 2. Детектор АМС (47).
 3. Испытательный полёт АМС-01 на космическом челноке Дискавери (48).
 4. Главная миссия: АМС-02 на Международной космической станции (50).
 - 4.1. Сверхпроводящий магнит. 4.2. Конструкция АМС-02.
 5. Физические результаты и их интерпретация (54).
 - 5.1. Электроны и позитроны. 5.2. Результаты по спектру протонов и гелия. 5.3. Антипротоны.
 6. Дискуссия и заключение (63).
- Список литературы (64).

1. Введение

Исследования, которые являются предметом настоящей статьи, находятся на стыке двух областей знания, бурно развивавшихся в течение последних десятилетий: физики элементарных частиц и астрофизики. Экспериментальная физика достигла уровня, когда теоретические идеи о "начале Вселенной" могут быть подвергнуты экспери-

ментальной проверке. Можно, например, попытаться проверить, что законы взаимодействия частиц, законы симметрии, которые справедливы в настоящее время и в нашей области Вселенной, действовали так же и на сравнительно ранней стадии образования видимой Вселенной, сразу после Большого взрыва. Можно проверить, соответствуют ли астрофизическим наблюдениям следствия фундаментальных законов, действующих в микромире.

В 1994 году по инициативе профессора Самюэля Тинга из Массачусетского технологического института (MIT) группой физиков ряда университетов Швейцарии, Германии, России, Италии, Франции, США, Испании, Португалии, Китая, Тайваня была предложена программа по проведению эксперимента в области физики элементарных частиц на строящейся тогда Международной космической станции Альфа (МКС). Программа была названа "Альфа-магнитный спектрометр" (АМС) и продолжается уже более 20 лет [1].

Идея эксперимента проста: Земля окружена слоем вещества, атмосферой, толщиной в один килограмм на квадратный метр, поэтому заряженные частицы достигают поверхности сильно ослабленными, да ещё в сопровождении многочисленных продуктов взаимодействия. Поэтому космологические эксперименты проводятся практически исключительно с электромагнитным излучением, а для работы с заряженными космическими частицами нужно выйти за пределы атмосферы.

Магнитный спектрометр на орбите предназначен для решения задач современной космологии.

Рассмотрим схематично [2] основные идеи, которые привели к созданию теории расширяющейся Вселенной.

Ю.В. Галактионов. Massachusetts Institute of Technology (MIT),
77 Massachusetts Ave, Cambridge, MA02139, USA
E-mail: iouri.galaktionov@cern.ch

Статья поступила 3 февраля 2016 г.,
после доработки 20 марта 2016 г.

Во времена Ньютона Вселенная представлялась статичной, и чтобы избежать очевидного гравитационного схлопывания, Ньютон вводил бесконечное количество галактик. Эйнштейн создал более реалистичную картину: он ввёл так называемый космологический член, т.е. дополнительное отталкивание больших масс. Наблюдение "красного смещения" и более надёжные измерения расстояний до далёких галактик привели к появлению фридмановской картины "разбегающихся галактик" и, соответственно, расширяющейся Вселенной, что позволило Хабблу постулировать свой знаменитый закон: скорости галактик пропорциональны расстояниям до них. Коэффициент пропорциональности, известный как "постоянная Хаббла", на самом деле постоянной не является, а согласно общей теории относительности зависит от времени. Если рассматривать Вселенную в достаточно большом масштабе, то к расширению приводят наблюдаемые с большой точностью её однородность и изотропность. Наиболее общая форма метрики, соответствующая изотропному и однородному пространству, содержит масштабный фактор R , учитывающий изменение координатной шкалы со временем. Увеличение R со временем как раз и приводит к расширению Вселенной.

В процессе расширения Вселенной наступает момент, когда радиация перестаёт взаимодействовать с веществом, поскольку с образованием нейтральных атомов свободные электроны исчезают, а фотоны остаются. Это происходит при температуре Вселенной около 4000 градусов. Спектр этих реликтовых фотонов — спектр излучения чёрного тела с температурой, соответствующей спектру, возникшему в момент, когда исчезли электроны. Этот спектр подвергся затем красному смещению в соответствии со скоростью и временем расширения Вселенной. Частоты при этом сдвигаются пропорционально R , поэтому спектр реликтового излучения получается соответствующим температуре примерно 5 К, прямые измерения формы спектра дают 2,73 К, что является блестящим подтверждением теории Большого взрыва.

Ещё одно наблюдение служит подтверждением теории Большого взрыва. Это успешное предсказание распространённости по отношению к водороду ${}^4\text{He}$, ${}^3\text{He}$, ${}^2\text{D}$, ${}^7\text{Li}$, источником которых являются ядерные реакции, происходившие в эпоху ранней Вселенной. Наблюдаемые величины близки к предсказаниям теории.

Ряд проблем теории Большого взрыва, такие как евклидовость (с огромной точностью, 10^{-15}) пространства в эпоху ранней Вселенной и проблема причинности (разные части Вселенной находятся при одной температуре, хотя обмен световыми сигналами между ними невозможен), решается путём введения инфляции — быстрого начального "раздувания".

1.1. Поиск антиядер

Одна из проблем теории Большого взрыва — это асимметрия барионов. Возникшие в равных количествах барионы и антибарионы по мере расширения и остывания Вселенной интенсивно аннигилируют и по окончании периода аннигиляции часть барионов сохраняется, а антибарионы, по крайней мере, в наблюдаемой части Вселенной исчезают полностью. Существует несколько теорий возникновения асимметрии барионов, не подвергавшихся, однако, экспериментальной проверке [3].

Экспериментально наличие антивещества можно было бы заметить по двум проявлениям. Первое — это обнаружение нерегулярности в спектре энергичных гамма-квантов, возникающей как следствие процессов барионной аннигиляции. Нерегулярность в спектре должна проявиться в области энергий в несколько МэВ. В этой области оказываются гамма-кванты от распада нейтральных мезонов, возникших при аннигиляции барион-антибарионных пар. Другой способ обнаружить антивещество — это поиск антиядер в космических лучах. Наблюдение антиядер гелия или более тяжёлых элементов было бы однозначным свидетельством существования антивещества. Трудность этого способа в том, что антиядра могут отклоняться магнитными полями в межгалактическом пространстве или в пространстве между скоплениями галактик или скоплениями скоплений и т.д. Поэтому интерпретация отрицательного результата эксперимента по поиску антиядер становится зависящей от наших знаний о магнитных полях Вселенной. К сожалению, современные средства наблюдения магнитных полей имеют недостаточную чувствительность.

1.2. Поиск тёмной материи

Ряд астрофизических наблюдений свидетельствует, что большая часть вещества во Вселенной не излучает свет, невидима для современных инструментов. Об этом свидетельствуют [4]:

- 1) скорости вращения галактик,
- 2) орбитальные скорости галактик внутри кластеров (на порядок выше ожидаемых),
- 3) гравитационные линзы,
- 4) реликтовое излучение (флуктуации на два порядка меньше ожидаемых),
- 5) плотность видимого вещества (на два порядка меньше критической),
- 6) крупномасштабная структура,
- 7) количество лёгких элементов (соответствуют низкой плотности видимого вещества).

Какие частицы образуют тёмную материю, неизвестно. Есть множество гипотез, в частности, в рамках суперсимметричной теории (SUSY), где тёмной материей являются нейтралыно, взаимодействия которых в Галактике рожают \bar{p} , e^+ и γ :

$$\begin{aligned} \chi + \chi &\rightarrow \bar{p} + \dots, \\ &\rightarrow e^+ + \dots, \\ &\rightarrow \gamma + \dots \end{aligned}$$

Естественно, что наблюдаемые спектры \bar{p} , e^+ и γ будут отличаться от производимых обычным веществом. Таким образом, прецизионные измерения спектров покажут, является ли нейтралыно составляющей тёмной материи.

Появление частиц тёмной материи в любом из каналов (e^+ , e^- , \bar{p} , ...) само по себе не будет достаточным для надёжной идентификации природы тёмной материи. Прямое или не прямое наблюдение частиц тёмной материи, из которых состоит гало нашей галактики, вряд ли даст достаточно информации, чтобы понять природу этих частиц. Эксперименты на коллайдере смогут идентифицировать долгоживущие слабо взаимодействующие частицы, но без связи с космологией. Только комбинируя различные подходы, можно разрешить тайну тёмной материи.

1.3. Спектры космических лучей

Измерения электромагнитного спектра космического излучения (реликтовое излучение, рентгеновское излучение, гамма-лучи) привело за последние полвека к крупным открытиям, удостоенным Нобелевских премий: открытие пульсаров, открытие реликтового излучения и его анизотропии, открытие нового типа пульсаров, открытие рентгеновских источников.

Благодаря большой длительности измерений и большой светосиле АМС выводит измерение спектров заряженных космических лучей на совершенно новый качественный уровень точности: вместо типичных значений в 30–40 % с помощью АМС достигаются величины в 1 % и менее. АМС получает очень большую статистику не только при измерениях протонов, электронов и гелия, для ряда ядер получены беспрецедентно точные измерения спектров бора, углерода, лития и многих других, причём при высоких и ранее недоступных энергиях. Эти измерения являются принципиально важными для изучения происхождения и распространения космических лучей.

2. Детектор АМС

Альфа-магнитный спектрометр [5, 6] предназначен для измерения спектров высокоэнергичных заряженных частиц с набором, в основном благодаря продолжительности эксперимента, большой статистики (в среднем на два-три порядка больше "стандартных" измерений в космических лучах). При создании детектора был учтён значительный опыт успешной постановки многих экспериментов в области физики высоких энергий на ускорителях.

Основными соображениями, приведшими к успеху, были следующие:

а) минимальное количество вещества на пути частицы, чтобы это вещество не становилось источником фона и не приводило к заметному увеличению событий ядерного рассеяния на большие углы;

б) многократные измерения импульса и скорости, чтобы фоновые частицы, которые подверглись ядерному рассеянию на большой угол в веществе детектора, не смешались с полезным сигналом.

В конфигурации, работающей сейчас на МКС, как показано на рис. 1, заимствованном из [6], детектор АМС состоит из следующих узлов:

1) двадцатислойный детектор переходного излучения (TRD), который идентифицирует электроны и позитроны с фактором подавления протонного фона 1000 при 1,5 ГэВ и до 100 при 300 ГэВ;

2) четыре слоя годоскопических счётчиков времени пролёта (TOF), которые обеспечивают точность измерения в 160 пс, а также выполняют ионизационные измерения;

3) девять плоскостей кремниевых детекторов (на рис. 1), которые, работая в поле постоянного магнита, обеспечивают измерение импульса (жёсткости) частиц;

4) счётчики антисовпадений, позволяющие регистрировать только те события, в которых частицы проходят через апертуру магнита;

5) черенковский детектор RICH, измеряющий скорость (с точностью 0,1 %) и заряд частиц и ядер; соединяя эти измерения с измерением импульса в трековом детекторе, можно однозначно определить массу частицы;

6) трёхмерный калориметр (ECAL), построенный из свинцовых пластин и слоёв сцинтилляционных нитей общей толщиной 16,7 радиационных длин, который измеряет энергию гамма-лучей, электронов и позитронов и отличает электроны и позитроны от адронов со степенью подавления 10^4 в диапазоне энергий от 1,5 ГэВ до нескольких сотен ГэВ (см. ниже).

Величина электрического заряда (Z) измеряется независимо координатным детектором (Tracker), черенковским детектором (RICH), счётчиками времени пролёта (TOF), знак заряда ($\pm Z$) и импульс частицы (P) измеряются по траектории в магните с помощью девяти плоскостей двухстороннего координатного кремниевого детектора. Скорость частицы ($\beta = v/c$) измеряется вре-

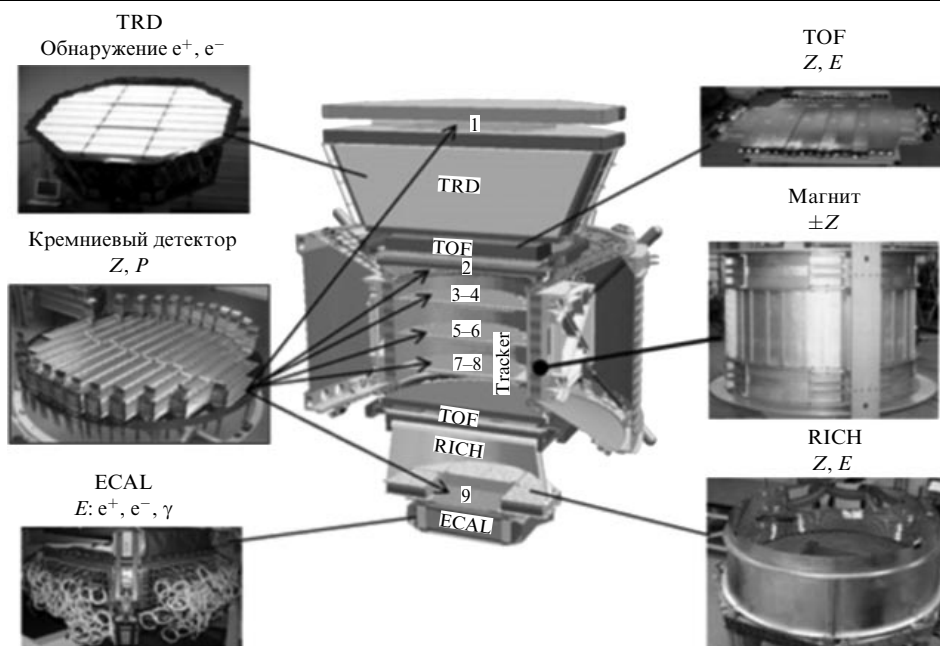


Рис. 1. Конфигурация детектора АМС, установленного на МКС.

мяпролётной системой (TOF), детектором переходного излучения (TRD) и черенковским детектором (RICH). Энергия электромагнитных частиц измеряется в калориметре (ECAL).

3. Испытательный полёт АМС-01 на космическом челноке Дискавери

Аппаратура детектора, и особенно электроника, разрабатывалась на основе электроники ускорительных экспериментов, ранее не использовавшейся в космических установках. Поэтому требовалось убедиться, что АМС может нормально функционировать в космическом пространстве, т.е. в вакууме с вариацией температуры от -65°C до 40°C , находясь в условиях интенсивной радиации, вызывающей повреждения полупроводниковых элементов электроники. Для этого было решено провести испытательный технический полёт на космическом челноке [7]. Детектор должен был выдержать условия очень сильной вибрации (150 дБ) и ускорения (3g) во время старта и торможения (6,5g) при приземлении. Тестовый полёт на челноке Дискавери был проведён в июне 1998 г.

Детектор работал на почти круговой орбите на расстоянии от Земли 400 км с наклоном плоскости орбиты $51,8^{\circ}$ — это обычная орбита существовавшей тогда космической станции Мир.

Принципиальная схема детектора показана на рис. 2.

В качестве анализирующего элемента спектрометра использовался постоянный магнит. Применение современного магнитного материала $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ позволило в достаточно большом объёме получить значения магнитной индукции около 1,5 кГс. Магнит имеет форму цилиндра длиной 80 см и внутренним диаметром 116 см, весит около двух тонн. Магнитное поле близко к однородному и направлено перпендикулярно оси цилиндра, обеспечивая эффективное отклонение частиц, летящих вдоль оси цилиндра.

Магнит выполнен из 64 секторов NdFeB . Каждый сектор состоял из ста блоков размером $5 \times 5 \times 2,5 \text{ см}^3$. На рисунке 3 приводятся направления магнитного поля для 64 секторов. Был использован материал с самым высоким (из имеющихся на рынке) уровнем магнитной энергии $(\text{BH})_{\text{max}} = 50 \text{ МГс Э}$.

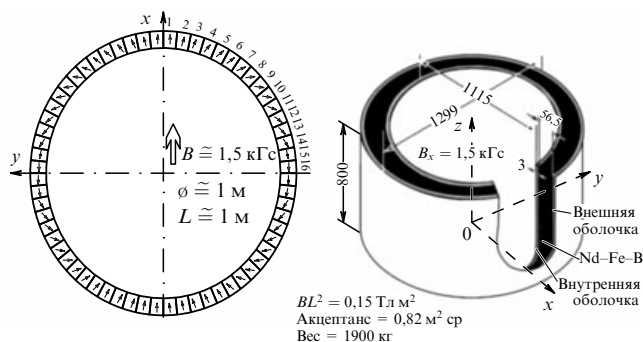


Рис. 3. Схема устройства постоянного магнита. Приводятся направления магнитного поля для 64 секторов.

Для проверки величины магнитного поля в данной конфигурации секторов была построена модель в масштабе 1:3 и, соответственно, были подтверждены величины поля, магнитного момента и утечек поля. Ещё одна модель магнита, в этом случае полномасштабная, была построена для проведения вибрационных испытаний и испытаний на ускорение. И, наконец, третья, тоже полномасштабная, модель была выполнена без использования клея для проверок в соответствии с техникой безопасности НАСА, поскольку не были достаточно изучены свойства клея при его длительной эксплуатации в условиях космического пространства.

По магнитному полю основные требования техники безопасности НАСА состояли в следующем.

1. Необходимо пренебрежимо малый дипольный магнитный момент. Заметный дипольный момент, взаимодействуя с магнитным полем Земли, приведёт к появлению разворачивающих и скручивающих сил, действующих на челнок или станцию. Поскольку прошлого опыта не было, в НАСА с самого начала, ещё при утверждении проекта АМС, были сомнения, можно ли создать мощный магнит с очень малым дипольным моментом.

2. Для обеспечения безопасности персонала требовалось, чтобы рассеянное поле магнита на расстоянии 2 м от центра магнита было меньше 300 Гс.

Реальный магнит с запасом удовлетворял этим условиям, магнитный момент был пренебрежимо мал, а утечка поля составила менее 3 Гс.

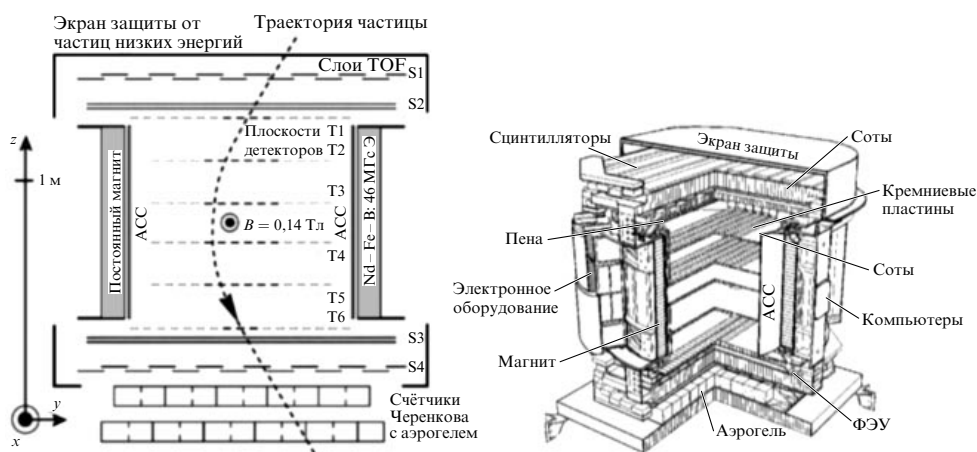


Рис. 2. Принципиальная схема детектора АМС-01. АСС — счётчик антисовпадений.

Измерение кривизны треков и определение, таким образом, величины импульса и знака заряда частицы производится шестью слоями кремниевых координатных детекторов [8]. Эти детекторы обеспечивают микронную точность измерения координат, позволяя в то же время измерить величину заряда по величине ионизационных потерь. На входе и выходе из магнита частица пересекает сцинтилляционные годоскопические счётчики системы времени пролёта (TOF) [9]. По измерению времени пролёта на базе около одного метра определяется скорость частицы. Типичная точность измерения времени для однозарядных частиц составила 150 пс. Комбинация импульса и скорости позволяет определить массу частицы. При скоростях частиц, слишком высоких для применения техники времени пролёта, для идентификации частиц используется черенковский счётчик с радиатором из аэрогеля, пористого вещества с показателем преломления 1,035. Общая компоновка детектора показана на рис. 2. Как видно из рисунка, внутренняя поверхность магнита закрыта счётчиком антисовпадений [10] для защиты от фона, возникающего от взаимодействий частиц в веществе магнита. Тонкий экран сверху и боковой снизу защищают установку от воздействия радиационных поясов Земли — электронов малых энергий.

Детектор не имел никакого кожуха и работал в вакууме космического пространства. Все элементы детектора при изготовлении и сборке были подвергнуты тщательным испытаниям на термовакuumном стенде, показавшим, что условия высокого вакуума и изменения температуры в широких пределах не ухудшают характеристик спектрометра. Успешные испытания детектора на вибростенде гарантировали устойчивость конструкции к сильным вибрациям во время работы ракетных двигателей космического челнока.

Во время десятидневного полёта было зарегистрировано около ста миллионов событий прохождения космических частиц через установку. Значительную часть этого времени, однако, космический челнок был состыкован с российской станцией Мир. В этот период ориентация детектора была неподходящей для АМС, детектор, например, был ориентирован в сторону Земли. Кроме того, в поле зрения АМС попадали части станции Мир, и взаимодействие космических лучей с материалом этих частей вызывало дополнительный нежелательный фон. Таким образом, полезная экспозиция, когда в поле зрения АМС был только далёкий космос, составила 4–5 суток.

Детектор снабжён большим количеством датчиков температуры и магнитного поля. Постоянное мониторингирование этих датчиков во время полёта позволило выбрать оптимальный температурный режим работы. При этом установленные на АМС нагревательные элементы практически не использовались, так как температура оказалась достаточно (иногда слишком) высокой, и температурный режим регулировался изменением ориентации челнока по отношению к положению Солнца. Компьютерные программы, работающие в режиме реального времени (online), позволяли следить за работой всех систем спектрометра.

Испытательный полёт выявил особенности эксперимента по физике частиц в условиях космического пространства. Создание основного варианта детектора для работы на МКС сильно выиграло от этого практиче-

ского понимания технических возможностей и реальных характеристик каждой компоненты детектора в условиях космического полёта. Уже через два часа после старта 2 июня 1998 г. были начаты проверки для введения в эксплуатацию аппаратуры АМС. Во время полёта детектор размещался в грузовом отсеке челнока и функционировал в вакууме. Установка запускалась совпадением сигналов четырёх счётчиков времени пролёта, фиксирующих прохождение частицы через трековый детектор. Работа детектора, а также температура и магнитное поле непрерывно мониторировались. Всего было зарегистрировано примерно сто миллионов запусков.

После полёта АМС был подвергнут детальной проверке. Детектор был установлен в пучке тяжёлых ионов ускорителя в Дармштадте с энергиями от 1 до 5,6 ГэВ и 600 различными входными углами. Со статистикой приблизительно 45 млн событий получены корректные массовые пики. Затем АМС был помещён в пучок протонов с изменением импульса пучка от 2 до 14 ГэВ и 1200 различными входными углами. Тест был выполнен со статистикой 100 млн событий. Непрерывное мониторингирование показало, что характеристики детектора до, во время и после полёта не изменялись.

Во время полёта, несмотря на его технический характер, была выполнена обширная научная программа.

1. *Поиски антигелия в космических лучах* [11]. Наблюдалось $2,86 \times 10^6$ ядер гелия и ни одного ядра антигелия в диапазоне энергий (жёсткостей) вплоть до 140 ГВ. В предположении, что спектр антигелия совпадает со спектром гелия, был получен верхний предел для потока антигелия по отношению к потоку гелия $1,1 \times 10^{-6}$ [12]. Это являлось существенным улучшением по сравнению с более ранними измерениями.

2. *Протоны на околоземных орбитах*. Новым наблюдением является обнаружение так называемого второго спектра (альбеда) [13, 14] помимо спектра первичных протонов, приходящих на Землю извне. Второй спектр чётко наблюдается при энергиях и на широтах, куда первичные протоны попасть не могут, т.е. ниже порога геомагнитного обрезания. Восстановление траекторий второго спектра показало, что все эти протоны рождаются в атмосфере, причём около 70 % происходят из очень ограниченной географической зоны.

3. *Лептоны на околоземных орбитах*. Измерены спектры электронов при энергиях 0,2–40 ГэВ и позитронов при энергиях 0,2–3 ГэВ. Наблюдались два вида спектров: первичный, в области высоких энергий, и вторичный, так называемый второй спектр (альбеда), при более низких энергиях, причём во втором спектре позитронов существенно больше, чем электронов, в противоположность первичному спектру [15, 16]. Как и в случае протонов, потоки частиц второго спектра одинаковы для частиц, направленных от Земли и к Земле, что указывает на их атмосферное происхождение. Восстановление траекторий второго спектра показывает, что большинство этих лептонов путешествуют в геомагнитном поле в течение долгого времени и возникают в атмосфере из двух симметричных географических областей, причём области происхождения для электронов являются областями стока для позитронов и наоборот.

Измерено отношение потока позитронов к суммарному потоку электронов и позитронов в первичном спектре при энергиях 1–30 ГэВ.

4. *Гелий на околоземных орбитах.* Исследован спектр гелия в области энергий 0,1–100 ГэВ/нуклон [17]. Выше порога геомагнитного обрезания спектр описывается степенной зависимостью, ниже порога наблюдается второй спектр, причём неожиданно оказалось, что более 90 % этого спектра соответствует ядрам ^3He .

5. *Космические протоны.* Спектр первичных протонов в области энергий 0,2–200 ГэВ измерен с большой точностью [18], что послужило необходимой информацией для оценки потоков атмосферных нейтрино.

6. *Дейтроны на околоземных орбитах.* Наблюдалось около 10000 ядер дейтерия при энергиях от 0,1 до 1 ГэВ/нуклон [6].

7. *Поиски антидейтерия в космических лучах.* Ядер антидейтерия обнаружено не было при измеренном потоке дейтерия 1×10^4 .

8. *Исследование захваченных и квазизахваченных частиц на околоземных орбитах.* Путём детального анализа траекторий частиц с энергиями ниже порога геомагнитного обрезания установлено наличие постоянно существующих захваченных протонов, электронов и позитронов, движущихся по траекториям, пересекающим Бразильскую магнитную аномалию [13, 14].

4. Главная миссия: АМС-02 на Международной космической станции

4.1. Сверхпроводящий магнит

Характеристики установки АМС должны были позволить достичь уровней, меньших $1/10^{10}$ по отношению антигелий/гелий, $e/p < 1/10^6$ по подавлению фона протонов в позитронах, при точности измерения спектров частиц лучше 1%. АМС должен был работать в области энергий до нескольких тераэлектронвольт [5].

Обеспечить такие характеристики, помимо других составляющих детектора, должен был любой из рассматриваемых спектрометров как с постоянным, так и со сверхпроводящим магнитом [19]. Разработка сверхпроводящего магнита была уникальной: по плану он должен был функционировать автономно в условиях космического пространства в течение 2–3 лет. Этому была посвящена значительная часть времени (и ресурсов!) при подготовке эксперимента.

Кроме того, поскольку не было известно, какой магнит, постоянный, работавший в АМС-1, или сверхпроводящий, будет использован, обеспечивалась полная взаимозаменяемость магнитов. Форма поля была тождественной (рис. 4), все геометрические размеры обеспечивали монтаж одних и тех же элементов установки с любым из магнитов.

Сверхпроводящая магнитная система АМС-2 состоит (см. рис. 4) из пары овальных (gacetrack) обмоток, образующих пару Гельмгольца. Они генерируют большую часть поперечного магнитного поля, в то время как 12 меньших овальных обмоток служат для увеличения поля, уменьшения рассеянного поля и уменьшения дипольного момента. Обмотки расположены внутри вакуумного объёма и работают при температуре 1,8 К. Они смонтированы вне гелиевого объёма и снабжены нетривиальной системой охлаждения, позволяющей в случае, хотя и маловероятном, срыва сверхпроводимости, снова охладить обмотки, используя имеющийся жидкий гелий.

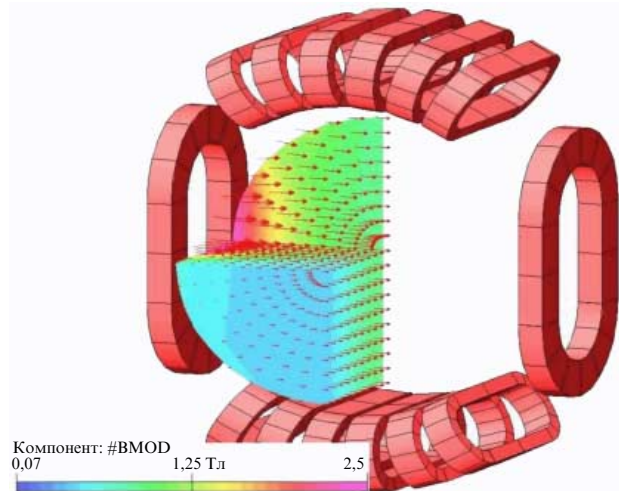


Рис. 4. Устройство обмоток сверхпроводящего магнита для получения идентичной с постоянным магнитом конфигурации поля. В обоих случаях обеспечивался один и тот же внутренний радиус, дипольный момент пренебрежимо мал и рассеянное поле в 2 м от центра меньше 300 Гс.

Во всех обмотках используется новый малого сечения, стабилизированный алюминием проводник, который был специально разработан для АМС магнитной группой Высшего технического университета в Цюрихе (ETH Zürich). Этот проводник уменьшает вероятность срыва сверхпроводимости (квенча) в 2000 раз. Этот новый материал массово производится в Цюрихе и теперь широко используется в экспериментах в области физики высоких энергий.

Магнитная система АМС состояла из сверхпроводящих обмоток, объёма со сверхтекучим гелием (2500 л) и криогенной системы. Всё это помещалось в вакуумный кожух. Снаружи кожуха располагались электроника, клапаны и кабельные системы. Магнит при запуске охлаждён до рабочей температуры (1,8 К), но тока в обмотках нет. Ток включается после монтажа АМС на МКС. После запуска гелий не восполняется и постепенно испаряется. Через 2–3 года гелий испаряется полностью, это и определяло время функционирования АМС.

На рисунке 5 показаны изготовленные обмотки магнита АМС. По мере изготовления магнит подвергался многочисленным испытаниям. Рисунок 6 демонстрирует выход магнита на стабильный температурный режим, условие стабильности: $dT/dt < 0,0001 \text{ К ч}^{-1}$.

В 2010 г. были проведены испытания готовой установки АМС на пучках ускорителя в ЦЕРНе.

Затем сверхпроводящий магнит был демонтирован и для проведения сравнительных испытаний на его место смонтирован постоянный магнит. На рисунке 7а¹ приведены результаты измерений координатного разрешения. На рисунке 7б сравниваются импульсные разрешения: красная линия для сверхпроводящего магнита, синяя — для постоянного. Количество координатных плоскостей: восемь для сверхпроводящего и девять для постоянного магнитов.

¹ В электронной версии рисунки даны в цветном изображении (см. сайт УФН www.ufn.ru).

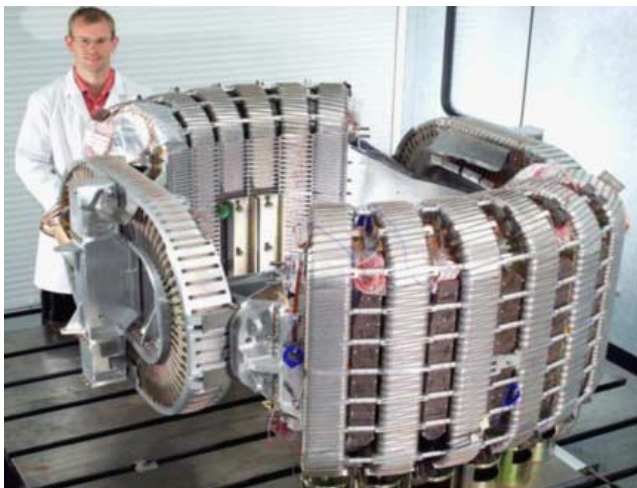


Рис. 5. Изготовленные обмотки магнита в сборе.

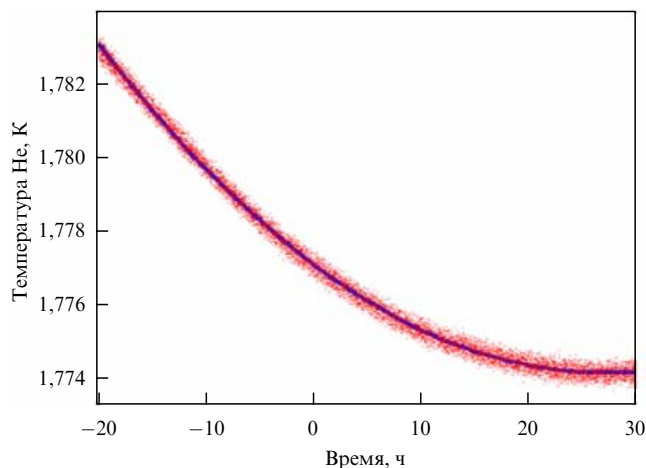


Рис. 6. Стабилизация гелиевого объёма АМС. Критерий стабильности: $dT/dt < 0,0001 \text{ K ч}^{-1}$. Ожидаемое время жизни АМС криостата на МКС — 28 ± 6 месяцев.

4.2. Конструкция АМС-02

Детектор АМС (см. рис. 1) был построен со сверхпроводящим магнитом, как это и предусматривалось проектом, который по первоначальному плану должен был длиться 2–3 года, что соответствовало времени жизни МКС. Однако в 2010 году НАСА объявило о решении продлить эксплуатацию МКС по крайней мере до 2020 года, и даже, вероятно, до 2028 года.

Чтобы использовать увеличившееся время работы МКС с учётом того, что заполнение гелиевого резервуара на орбите невозможно, сверхпроводящий магнит необходимо было заменить постоянным.

Магнитное поле постоянного магнита за 12 лет не изменилось в пределах точности (1%) первоначальных измерений.

Кратко рассмотрим основные компоненты АМС-02.

Координатный детектор АМС (трекер) в настоящее время является самым большим трековым детектором (площадью $6,7 \text{ м}^2$), построенным для космических исследований [20]. Достигнутые точности были бы очень высокими даже для наземных установок. Испытательный полёт АМС-01 1998 года доказал успешность адап-

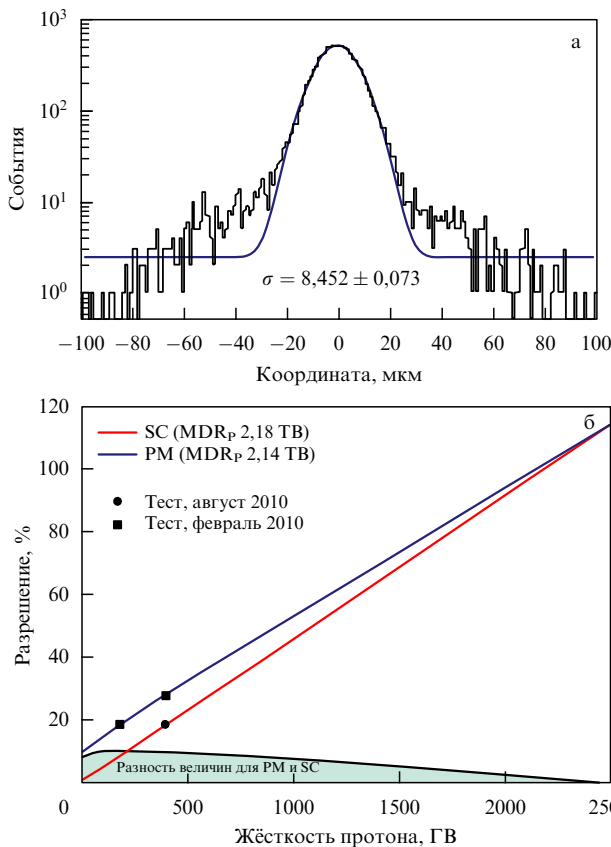


Рис. 7. (В цвете онлайн.) (а) Измерение координатного разрешения одной плоскости трекера на пучке мюонов 120 ГэВ: ширина распределения 8,5 мкм. (б) Сравнение разрешений по импульсу для двух магнитов, сверхпроводящего (SC, красная кривая) и постоянного (PM, синяя кривая).

тации ускорительных технологий к условиям космоса и техническую возможность создания координатных детекторов большой площади. Полупроводниковые детектирующие элементы трекера выполнены из тонких кремниевых пластин (wafer), на которых с одной стороны (p-side) нанесены продольные кремниевые полоски (strips), а с другой стороны (n-side) — поперечные полоски. Таким способом стало возможным измерять x – y -координаты одним детектором, обеспечивая минимальное количество вещества на пути частицы (0,3% радиационной длины). Размер шага считывания составляет 27,5 мкм в одной проекции, используемой для измерения кривизны, и 208 мкм в ортогональной проекции. Более 4000 сенсоров было изготовлено, чтобы отобрать 2500 самого высокого качества, необходимых для трекера.

Для проверки качества работы трекера была выполнена целая серия тестов, включая интенсивные проверки на уровне элементов трекера, и затем — исследования в пучках минимально ионизирующих частиц, лёгких и тяжёлых ионов. В качестве примера на рис. 7а приводится результат измерений координатного разрешения на пучке мюонов энергией 120 ГэВ: ширина распределения 8,5 мкм для измеряющей импульс проекции и 30 мкм для другой.

Детектор переходного излучения (TRD). Переходное (рентгеновское) излучение возникает при пересечении частицей границы двух сред с разными электрическими

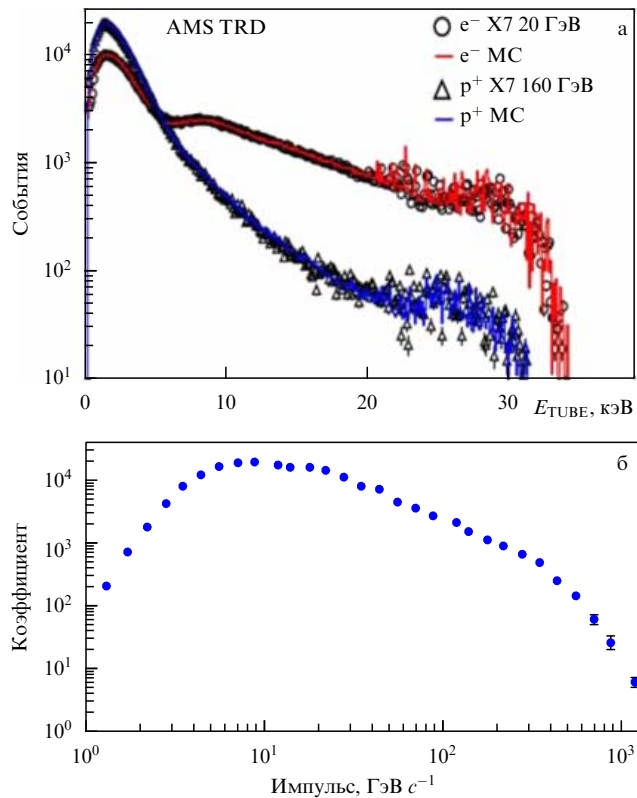


Рис. 8. Испытания на пучке одиночного слоя TRD: \circ — электроны 20 ГэВ; Δ — протоны 160 ГэВ. (б) TRD: Коэффициент подавления протонов в зависимости от жёсткости при эффективности детектирования электронов 90 %. Данные с МКС.

характеристиками. Граница приводит к трансформации поля заряда частицы. Интенсивность излучения пропорциональна γ -фактору частицы, на чём и основана возможность разделения частиц: γ -фактор электрона с энергией несколько ГэВ на три порядка больше γ -фактора протона с той же энергией. Детектором излучения [21] служат слои пропорциональных трубок, чередующиеся со слоями пластика. Вероятность излучения мала (10^{-4}), и для увеличения интенсивности радиатор выполнен из многослойного пористого пластика (fleece) толщиной 22 мм. Трубки заполнены смесью ксенона и углекислого газа, наиболее благоприятный диапазон $500 < \gamma < 10000$. Результат испытаний одиночного слоя TRD показан на рис. 8а. Хорошо виден вклад переходного излучения. Насколько эффективно TRD подавляет протонный фон при регистрации 90 % электронов, иллюстрирует рис. 8б.

Счётчики времени пролёта (TOF) [9] обеспечивают быстрый триггер, отбор частиц, попадающих в телесный угол установки, измеряют время пролёта, включая разделение частиц, идущих сверху и снизу, и осуществляют измерение величины заряда частицы. Система TOF разработана на основе хорошо известной сцинтилляционной техники, позволяющей достичь временного разрешения 160 пс. Система TOF, а с ней, соответственно, и вся установка имеет светосилу 0,4 м² ср. TOF состоит из четырёх плоскостей годоскопических счётчиков, две плоскости расположены над магнитом и две под ним, чувствительная площадь плоскости 1,2 м², плоскость собрана с перекрытием отдельных сцинтилляторов по краям, чтобы избежать щелей. В каждой паре рядом расположенных плоскостей счётчики ориентированы в

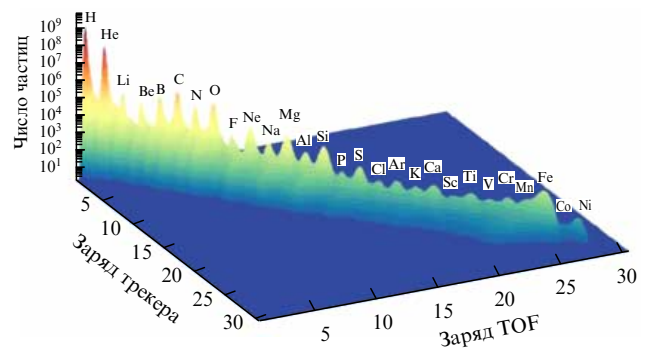


Рис. 9. Измерения спектра ядер в космических лучах. Показаны результаты ионизационных измерений TOF и трекара. Рисунок иллюстрирует возможности АМС.

перпендикулярных направлениях. TOF измеряет ионизационные потери заряженной частицы с разрешением, достаточным для определения заряда вплоть до $Z > 26$, при этом необходим и, соответственно, обеспечивается динамический диапазон измерения амплитуд более 10000. Благодаря принятым мерам: механической прочности, радиационной стойкости, устойчивости к температурным перепадам (-20 – $+50$ °С), многократному дублированию наиболее ответственных узлов электроники — система может в течение многих лет успешно эксплуатироваться на МКС.

На рисунке 9 приведены данные измерения спектра ядер в космических лучах. Показаны результаты ионизационных измерений TOF и трекара. Рисунок иллюстрирует возможности АМС.

Сцинтилляционные счётчики антисовпадений [10] расположены по внутренней поверхности магнита, окружая трекара и защищая его таким образом от частиц, проникающих через боковые поверхности магнита. Соседние сцинтилляторы соединяются замком в виде ласточкиного хвоста, чтобы обеспечить герметичность.

Черенковский детектор — RICH [22]. Прецизионное измерение массы частицы необходимо для решения многих задач физической программы АМС. Масса частицы определяется по измерению импульса в магнитном спектрометре АМС, а для прецизионного измерения скорости специально разработан черенковский детектор RICH, обеспечивающий относительную точность 1/1000. RICH обладает большой светосилой и работает в условиях вакуума и температурных перепадов открытого космического пространства. Фотоны излучаются в конусе с углом раскрытия 2θ : $\cos \theta = 1/\beta n(\omega)$, соответствующее пороговое значение скорости определяется по формуле $\beta_{\min} = 1/n(\omega)$, где $n(\omega)$ — показатель преломления радиатора. Количество фотонов, испущенных в диапазоне частот $d\omega$ при прохождении частицей расстояния dx , равно $d^2N/d\omega dx = \alpha Z^2 \sin^2 \theta$, т.е. угол раскрытия конуса определяется скоростью частицы, а число испущенных фотонов — её зарядом (Ze).

Структура RICH показана на рис. 10а. Сверху находится радиатор, где возникает черенковское излучение. Радиатор — двойной: большая его часть — это силикагель с показателем преломления 1,05, а в центральной части (рис. 10а) находится NaF с показателем преломления 1,336 для работы в области меньших энергий. Черенковский свет отражается от рефлектора и регистри-

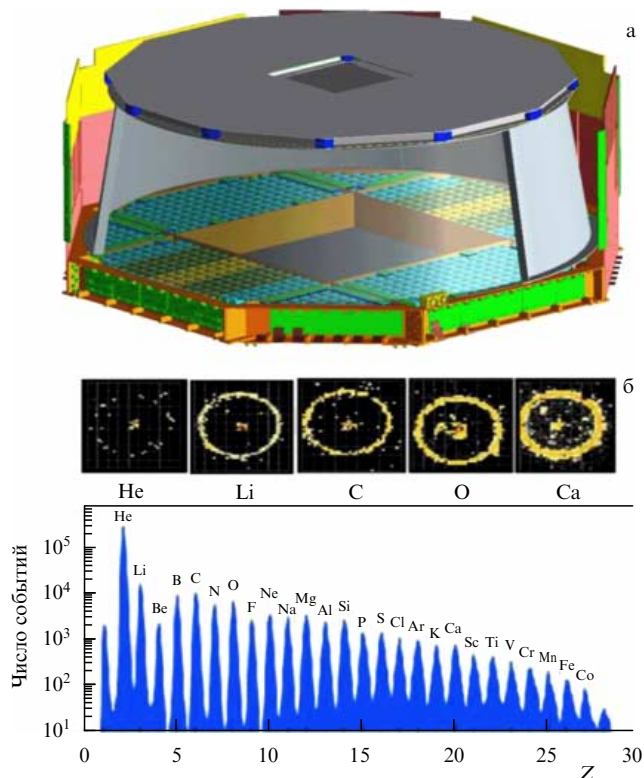


Рис. 10. (а) Структура Черенковского детектора (RICH). (б) Мгновенные снимки колец черенковского излучения для различных ядер. В нижней части — спектр ядер, полученный в пучке тяжёлых ионов.

руется фотоумножителями, расположенными в нижней части RICH.

Результат работы RICH иллюстрирует рис. 10б, где показаны мгновенные снимки (snapshots) колец черенковского излучения для различных ядер. Радиусы колец определяют скорость частицы, а величина амплитуд сигналов определяет её заряд. В нижней части рис. 10б показан спектр зарядов, полученный в пучке тяжёлых ионов.

Счётчик полного поглощения — электромагнитный калориметр (ECAL) — служит для прецизионного измерения энергии электронов и позитронов и эффективного отделения их от адронов. Подавление адронов состав-

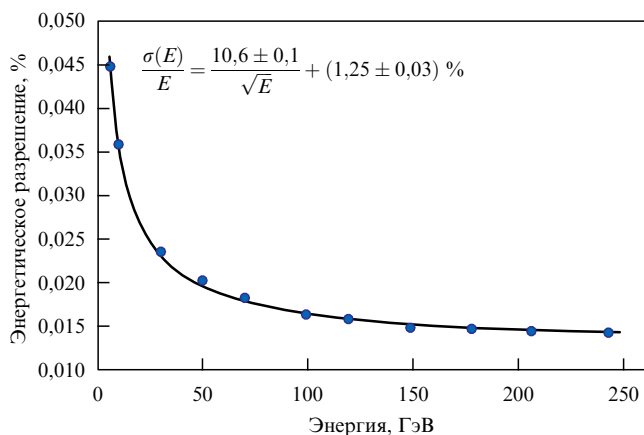


Рис. 11. Энергетическое разрешение калориметра как функция энергии. Данные получены на пучке электронов высокой энергии.

ляет 10^4 в области энергий от 1,5 ГэВ до 1 ТэВ. Калориметр выполнен в виде многослойной сборки — сэндвича — из тонких (1 мм) свинцовых пластин, чередующихся со слоями нитей из сцинтиллятора (1 мм), полная толщина калориметра составляет 16,7 радиационных длин [23]. Фактически калориметр состоит из блоков, объединяющих сборки из 11 свинцовых слоёв, перемежающихся с 10 слоями нитей. Нити в блоках располагаются в одном направлении, а блоки монтируются в калориметр с чередованием x - и y -ориентаций нитей. Таким образом обеспечивается трёхмерное восстановление события. Как видно из рис. 11, энергетическое разрешение калориметра составляет 2–3 %, угловое разрешение 1° и разделение $e/p \sim 10^4$ вплоть до энергий 200 ГэВ и выше².

Электроника АМС [6] основана на последних высокотехнологичных разработках, используемых в экспериментальной физике частиц, они были адаптированы для работы на орбите. НАСА обеспечивало электрическое соединение АМС с системами станции — электропитание АМС, низкоскоростную (LRDL) и высокоскоростную (HRDL) компьютерную связь.

Электропитание станции обеспечивается восемью большими солнечными панелями. АМС имеет две питающие линии, каждая запитывается от одной из панелей, разрешённый суммарный максимум мощности для АМС составляет 2400 Вт. АМС удовлетворяет простым требованиям НАСА в отношении электроизоляции, заземлений, электромагнитных наводок, бросков тока, импеданса.

Через низкочастотную связь (LRDL) передаются телеметрические данные мониторингования, обеспечивающие полный контроль всех элементов АМС и, если необходимо, исполнение поступающих с Земли команд управления, изменяющих рабочие параметры установки. Максимальный разрешённый АМС объём информации, передаваемый по связи LRDL, составляет 20 кбит s^{-1} . Основной объём данных АМС передаётся по связи HRDL. Через HRDL данные с АМС поступают на МКС со скоростью вплоть до 60 Мбит s^{-1} . Далее с помощью вспомогательных спутников (TDRS) передача на Землю в радиодиапазоне (KU) осуществляется со скоростью вплоть до 43 Мбит s^{-1} , при этом для АМС выделяется 10 Мбит s^{-1} в среднем по орбите. В АМС используется промежуточный буфер на одном из четырёх компьютеров системы считывания.

Поток физической информации определяется триггерной системой, т.е. совпадениями сигналов счётчиков времени пролёта при отсутствии сигналов счётчиков антисовпадений. Скорость счёта изменяется в диапазоне от 200 до 2000 Гц. Электроника АМС рассчитана на нормальную работу при вдвое более высоких скоростях.

Специальный компьютер, АМС Laptop, является пультом управления под контролем персонала МКС. Его основная функция — это создание на станции архива данных АМС. Полный объём электроники в установке

² Для получения этого разделения e/p были использованы: (1) метод BDT (Boosted Decision Tree Classification Method) [24] с применением 12 параметров измерения события в калориметре, (2) детальная симуляция событий методом Монте-Карло при энергиях до 1 ТэВ с калибровкой в пучках высокой энергии (вплоть до 400 ГэВ) ускорителя SPS в ЦЕРНе, (3) идентификация электронов и протонов в детекторе переходного излучения (TRD). Подробности см. в [25].

АМС содержит 300000 каналов, что эквивалентно всей остальной электронике МКС.

Большая продолжительность миссии АМС требует нового подхода к организации наземного комплекса обработки поступающих с МКС данных. Во время полёта анализ данных проводится непрерывно. Физики имеют непрерывный доступ к информации. Наземное компьютерное оборудование организовано в двух центрах, расположенных в ЦЕРНе.

- В центре контроля, выборочной обработки и операций (РОСС) круглосуточно 7 дней в неделю работает группа физиков, постоянно контролирующая работу всех систем АМС и с помощью команд корректирующая функционирование тех или других элементов установки. Контроль за работой и управление детектором осуществляются только из этого центра.

- В центре массовой физической обработки данных (SOC) существующее математическое обеспечение позволяет обрабатывать статистику со скоростью набора данных.

Контроль температуры АМС [26] является одной из самых сложных задач и требует постоянного внимания. Фактически непрерывное наблюдение за изменением температуры элементов детектора является главной задачей группы физиков в центре РОСС, круглосуточно дежурящей в центре управления. Тепловая обстановка в космическом пространстве, окружающем АМС, является очень сложной. В зависимости от положения МКС различные части детектора подвергаются быстро меняющемуся прямому солнечному облучению, которое чередуется с глубоким холодом космического пространства. Мощность в 2 кВт выделяется в самой установке. Нужно принимать во внимание и альбедо — тепловое излучение Земли. В таких условиях, поскольку функционирование различных детекторов зависит от температуры, температура этих детекторов должна не только постоянно находиться в заданных пределах, но и быть стабильной во времени. Наиболее сильное влияние на тепловые условия АМС оказывает солнечная радиация, которая прежде всего определяется так называемым углом бета, углом между плоскостью орбиты МКС и направлением на Солнце. Этот угол изменяется в диапазоне от $-75,1^\circ$ до $75,1^\circ$, и если угол бета превышает 70° , орбита полностью освещена Солнцем, в то время как для углов бета вблизи нуля около 40 % орбиты находится в тени Земли. Большую часть времени угол бета лежит между -50° и 50° .

С учётом сложности тепловой обстановки АМС была разработана детальная компьютерная модель, которая принимала во внимание все источники тепла, как внешние (солнечная радиация), так и внутренние (мощность 2000 Вт, рассеиваемая электроникой АМС). Для излучения этих потоков тепла во внешнее пространство используются панели-радиаторы, расположение которых тщательно моделировалось, поскольку разные части детектора облучаются и излучают по-разному. Эта задача потребовала многих итераций, проработки многих вариантов. На рисунке 12 показана конфигурация радиаторов АМС. Приводятся величины мощностей радиации, излучаемых в пространство.

Окончательной верификацией модели была экспериментальная проверка, которая была проведена в центре Европейского космического агентства в Голландии. АМС детектор был помещён в большую термовакуум-

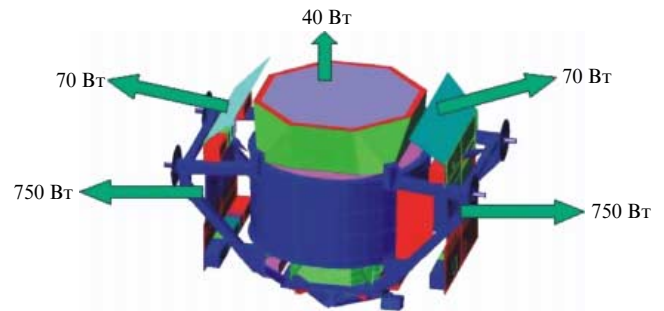


Рис. 12. Расположение радиаторов АМС. Приведены излучаемые в пространство мощности.

ную камеру, используемую для испытаний спутников. В камере были воспроизведены условия космического пространства: вакуум, температура, солнечная радиация и т.д. АМС работал в этих условиях с соответствующей вариацией температуры и других параметров. Испытания подтвердили выводы используемой термо-модели.

Установление непрерывного контроля за тепловым режимом АМС явилось наиболее трудной задачей, в частности и потому, что в прошлом ускорительном опыте физиков таких проблем не существовало.

5. Физические результаты и их интерпретация

Физические результаты, полученные АМС в 2011–2015 годах, опубликованы в работах [27–33].

По общепринятой сейчас схеме заряженные космические лучи распространяются в Галактике путём диффузии, рассеиваясь на неоднородностях магнитного поля, причём межзвёздная радиация приводит к потерям энергии. Для ядер возникают также процессы столкновений и радиоактивного распада, приводящие к фрагментации. Кроме того, спектры космических лучей модифицируются благодаря конвекции, вызываемой галактическим ветром, а также межзвёздными ударными волнами, на которых происходит ускорение частиц. Поэтому спектр частиц на Земле существенно отличается от спектров, испускаемых источником.

Вторичные электроны и позитроны возникают в результате столкновений протонов с протонами и ядрами межзвёздной среды. В этих столкновениях рождаются пионы и каоны, распадающиеся в конечном итоге в лептоны. Широко используемый в настоящее время для описания распространения космических лучей инструмент, программа GALPROP [34], является наиболее продвинутой, и её результаты фактически составляют основу современной "стандартной" картины происхождения, ускорения и распространения космических лучей. Однако GALPROP имеет ряд существенных приближений: космические лучи происходят из остатков взрывов сверхновых, причём распространение источников непрерывно, а распространение самих космических лучей изотропно.

Большинство электронов космических лучей по современным представлениям являются "первичными", рождаются и ускоряются в остатках вспышек сверхновых, в то время как позитроны, будучи "вторичными", происходят из столкновений адронов с ядрами межзвёздной среды. В этой концепции спектры электронов и

позитронов не испытывают никаких особенностей при энергиях порядка ТэВ, а отношение позитронов к электронам должно монотонно уменьшаться.

Оценки показывают, что источник наблюдаемых электронов и позитронов находится не далее 1 кпк. Поэтому пространственное распределение и спектр испускания источников в указанной зоне может заметно изменять предсказания, основанные на изотропном распределении усреднённых источников.

"Стандартная" картина приводит к общепринятому описанию спектра как степенной функции:

$$\Phi = CE^\gamma,$$

с одним и тем же показателем степени в широком диапазоне энергий от 10 ГэВ до 100 ТэВ. Такое поведение является естественным в предположении, что ускорение протонов происходит при взрыве сверхновых, равномерно распределённых по диску Галактики. Показатель спектра близок к трём и для разных частиц подбирается в соответствии с измерениями.

Суммарные спектры лептонов измерялись несколько раз до появления данных АМС-02. Недавние измерения при энергиях до нескольких ТэВ получены на установках ATIC [35], HESS [36], MAGIC [37] и FERMI [38], а также PAMELA [39]. Сравнивая эти результаты, мы понимаем, что одной из основных трудностей являются систематические расхождения данных различных детекторов. Данные PAMELA приближаются к необходимому уровню

точностей, но только прецизионные измерения АМС-02 решают проблему.

5.1. Электроны и позитроны

5.1.1. Анализ спектров. С помощью АМС проведены прецизионные измерения спектров электронов и позитронов на базе общей статистики $4,1 \times 10^{10}$ событий в диапазоне энергий 0,5–700 ГэВ для электронов и 0,5–500 ГэВ для позитронов. Результаты АМС по спектрам электронов и позитронов, умноженные на E^3 , представлены на рис. 13 вместе с недавними измерениями. На рисунке 14 спектры при энергиях ниже 200 ГэВ рассматриваются более детально. При энергиях ниже 10 ГэВ как электроны, так и позитроны подвержены влиянию солнечной модуляции, что заметно по изменению величин потоков этих частиц во время продолжительных измерений. Для энергий выше 20 ГэВ влияние солнечной модуляции незначительно. Результаты показывают, что в диапазоне 20–200 ГэВ спектр электронов уменьшается с уменьшением энергии быстрее, чем спектр позитронов, т.е. спектр электронов мягче. Это может указывать либо на первичный характер происхождения позитронов, либо на вторичный характер происхождения электронов, либо и на то и на другое, в любом случае это трудно объяснить в рамках традиционной модели диффузионного распространения космических лучей.

Как видно из рис. 13, ни электронный, ни позитронный спектры не могут быть описаны степенным законом

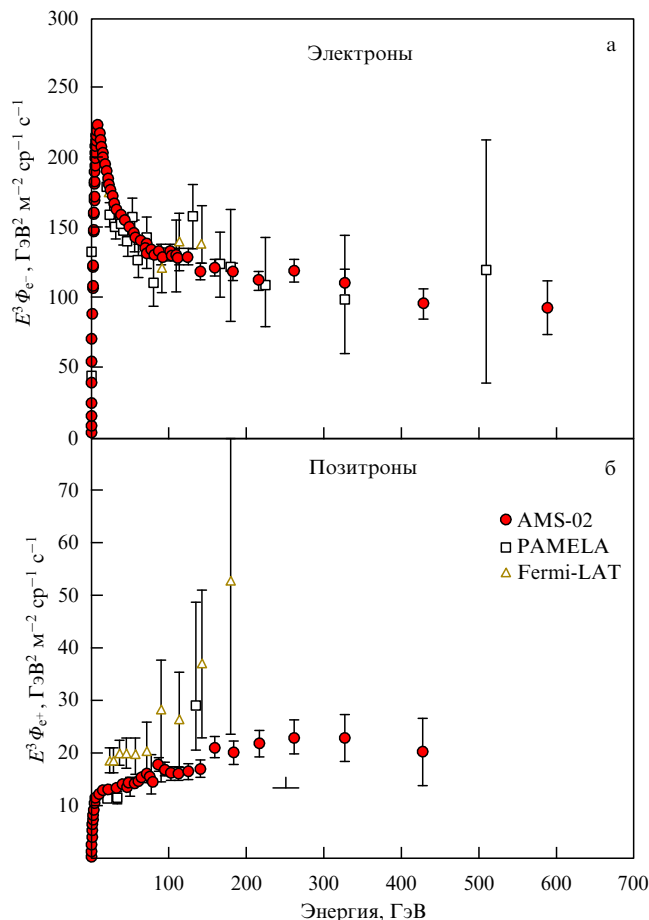


Рис. 13. Результаты АМС [30]. Спектры электронов (а) и позитронов (б), умноженные на E^3 . Также показаны данные [38, 39].

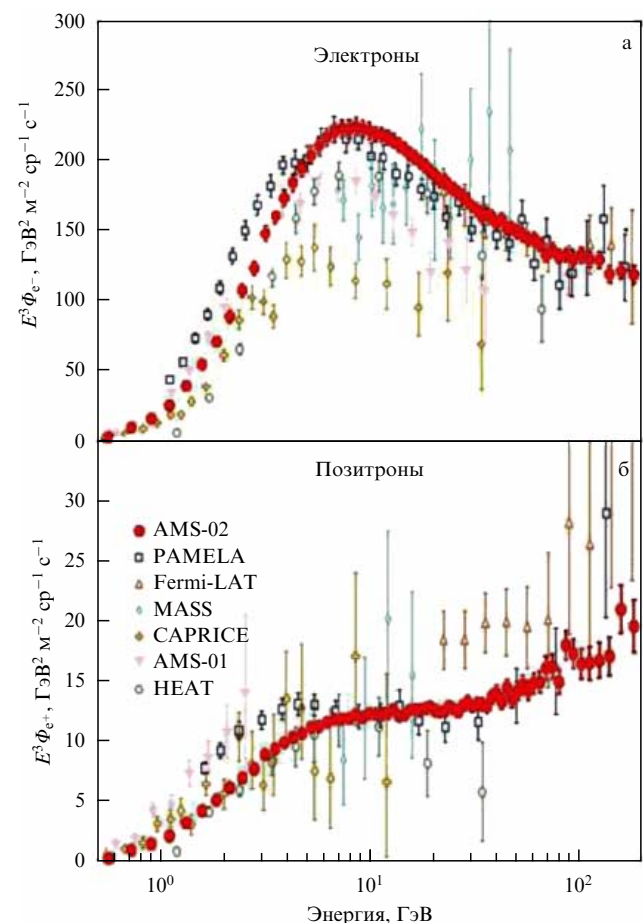


Рис. 14. Результаты АМС [30]. Спектры электронов (а) и позитронов (б) при энергиях ниже 200 ГэВ в сравнении с данными [16, 38–42, 44].

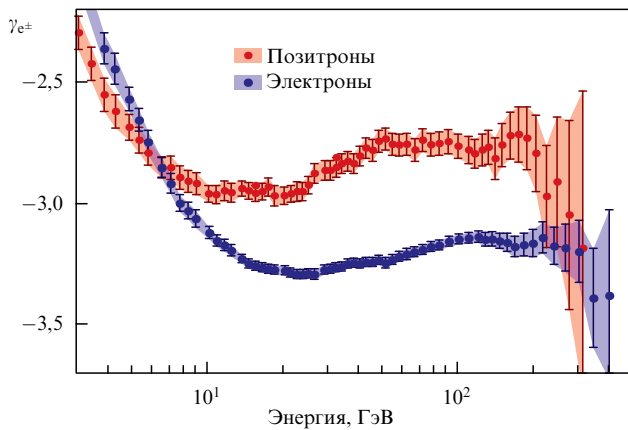


Рис. 15. Спектральные индексы γ_{e^-} и γ_{e^+} как функции энергии. Заштрихованная область показывает доверительный интервал 68 %.

с единым показателем степени во всём исследуемом интервале энергий.

Для количественного анализа энергетических спектров было выполнено фитирование с использованием скользящего энергетического окна с шириной, достаточной для надёжного определения локального значения γ :

$$\Phi_{e^\pm}(E) = C_{e^\pm} E^{\gamma_{e^\pm}}, \quad \gamma_{e^\pm} = \frac{d[\log \Phi_{e^\pm}]}{d[\log E]}. \quad (1)$$

Результат представлен на рис. 15. Анализ показывает, что нижний предел энергии, начиная с которого спектр может быть описан степенным законом с единым показателем степени, составляет 27,2 ГэВ для позитронов и 52,3 ГэВ для электронов.

Выше 20 ГэВ, т.е. за пределами влияния солнечной модуляции, спектральные индексы (показатели степени) электронов и позитронов существенно различны. От 20 до 200 ГэВ γ_{e^+} существенно больше, чем γ_{e^-} , откуда следует, что наблюдаемое увеличение доли позитронов с увеличением энергии связано с тем, что спектр позитронов становится более жёстким, а не со смягчением электронного спектра, наблюдаемого выше 10 ГэВ.

На рисунке 16 приведены результаты измерения суммарного спектра электронов и позитронов [29] вместе с

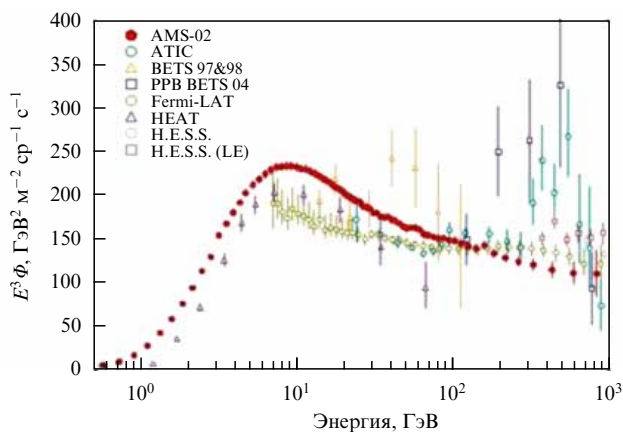


Рис. 16. Результат измерения суммарного спектра электронов и позитронов. Приведены также более ранние измерения [35, 38, 42, 44–46].

более ранними измерениями, которые заметно уступают данным АМС в смысле точности. Определение энергетической зависимости спектрального индекса по формуле (1) даёт результат, показанный на рис. 17а. Умноженный на E^3 спектр $\Phi(e^+ + e^-)$ (рис. 17б) демонстрирует, что выше 30 ГэВ и вплоть до 1 ТэВ спектр может быть описан единой степенной функцией (1) с $\gamma = -3,170 \pm 0,008$.

Доля позитронов, $\Phi_{e^+}/(\Phi_{e^+} + \Phi_{e^-})$, измерялась в области энергий 0,5–500 ГэВ. На рисунках 18 и 19 приведены данные АМС измерения энергетической зависимости доли позитронов в двух энергетических интервалах [28]. Рисунок 18 показывает, что доля позитронов быстро уменьшается в диапазоне 1–8 ГэВ, как и ожидается в "стандартной" картине диффузионного рождения позитронов как вторичных частиц. Затем убывание сменяется устойчивым ростом и, как видно на рис. 19, рост прекращается при энергии ~ 200 ГэВ. На тех же рис. 18, 19 приводятся результаты предыдущих экспериментов [16, 36, 38–43]. Данные АМС значительно точнее, что позволяет впервые провести количественный анализ и сравнение с моделями.

На рисунке 20а представлен наклон S энергетической зависимости доли позитронов, описанный линейной функцией:

$$S = c \log \frac{E}{E_0},$$

где c — нормировка, E_0 — энергия, при которой функция S пересекает ось абсцисс, т.е. энергия, при которой доля позитронов достигает максимума, $E_0 = 275 \pm 32$ ГэВ.

Результаты по зависимости доли позитронов от энергии сравниваются с так называемой "минимальной моделью", в которой потоки электронов (Φ_{e^-}) и позитронов (Φ_{e^+}) описываются суммой степенной функции (диф-

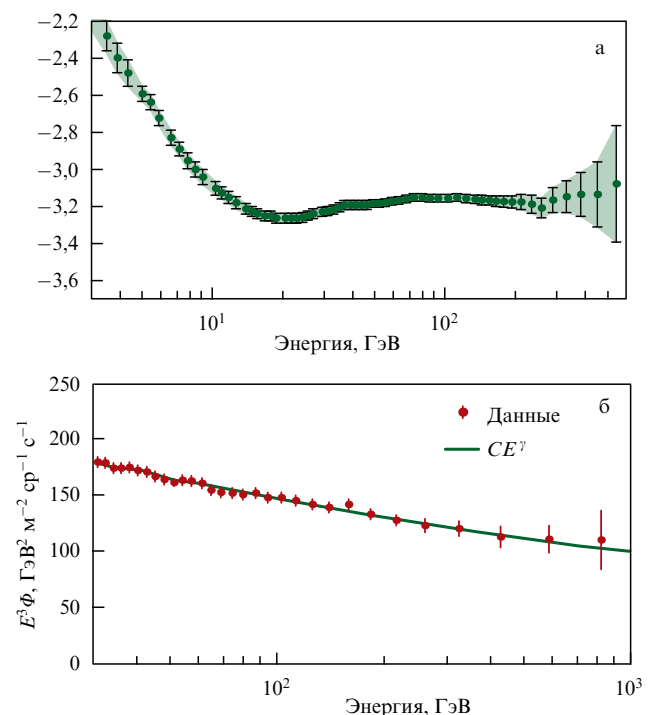


Рис. 17. (а) Спектральный индекс суммарного спектра. (б) Фит суммарного спектра степенной функцией.

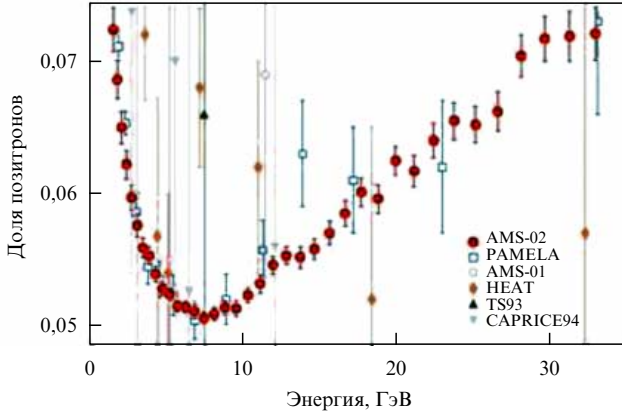


Рис. 18. Энергетическая зависимость доли позитронов при энергиях 1–35 ГэВ. Также показаны данные [16, 39–42].

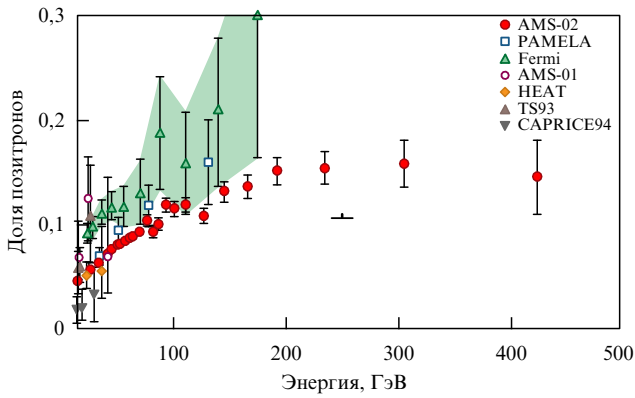


Рис. 19. Энергетическая зависимость доли позитронов при энергиях 10–500 ГэВ. Также показаны данные экспериментов PAMELA [39], FERMI-LAT [38] и других [16, 36, 40–42].

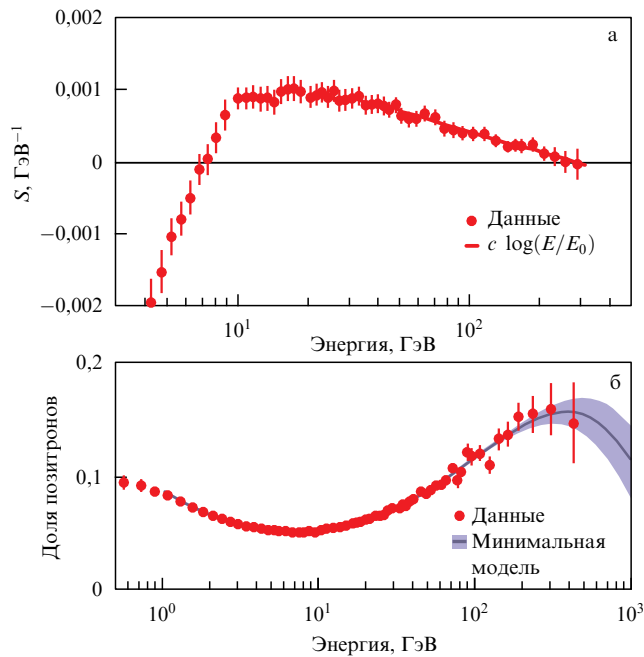


Рис. 20. (а) Наклон энергетической зависимости доли позитронов. (б) Сравнение с минимальной моделью. Фитирование в интервале 1–500 ГэВ.

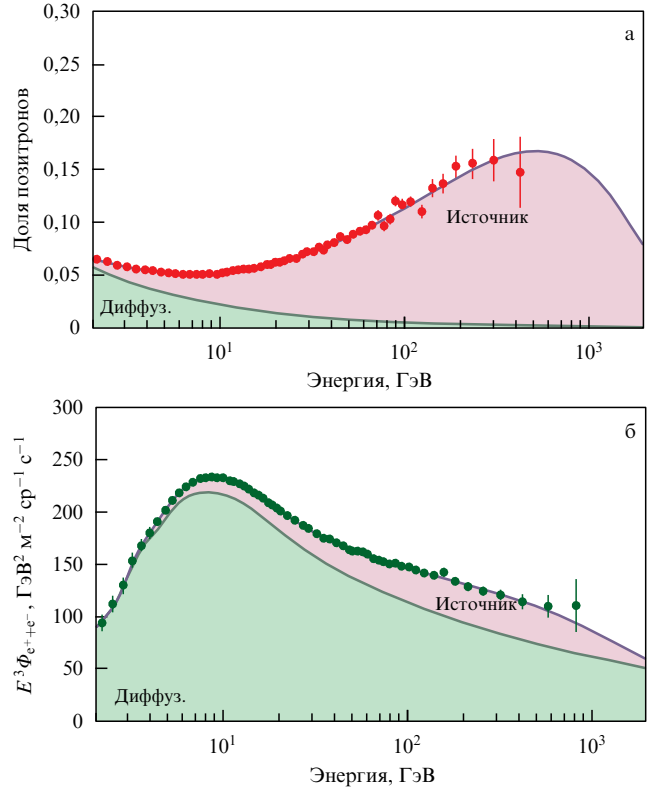


Рис. 21. (В цвете онлайн.) (а) Вклады спектров минимальной модели в энергетическую зависимость доли позитронов. (б) То же для суммарного $e^+ + e^-$ спектра. Розовым показан спектр источника, зелёным — диффузионный спектр.

фузионный член) и общим для e^+ и e^- членом (спектр источника):

$$\Phi_{e^+} = C_{e^+} E^{-\gamma_{e^+}} + C_s E_s^{-\gamma} \exp\left(-\frac{E}{E_s}\right),$$

$$\Phi_{e^-} = C_{e^-} E^{-\gamma_{e^-}} + C_s E_s^{-\gamma} \exp\left(-\frac{E}{E_s}\right).$$

Здесь коэффициенты C представляют относительный вес соответствующей компоненты, γ — показатель степенной функции (спектральный индекс) и E_s — характеристическая энергия обрезания спектра источника. Результат фитирования с пятью параметрами показан на рис. 20б. Значения параметров: $C_{e^+}/C_{e^-} = 0,091 \pm 0,001$, т.е. вес диффузного позитронного спектра составляет 9% от соответствующего электронного; $C_s/C_{e^-} = 0,0061 \pm 0,0009$, т.е. вес спектра общего источника составляет 0,6% от диффузионного спектра электронов. Сравнение спектральных индексов показывает, что диффузионный спектр позитронов мягче аналогичного спектра электронов, иными словами, убывает с ростом энергии быстрее, с другой стороны, диффузионный спектр электронов убывает с ростом энергии быстрее, чем спектр источника.

Более детальное сравнение с минимальной моделью иллюстрируют рис. 21 и 22, где показаны вклады диффузионных спектров и общего спектра источника. На рисунке 21а видно, что основной вклад, особенно в области высоких энергий, в долю позитронов вносит спектр источника, в то время как в спектре $e^+ + e^-$ (рис. 21б)

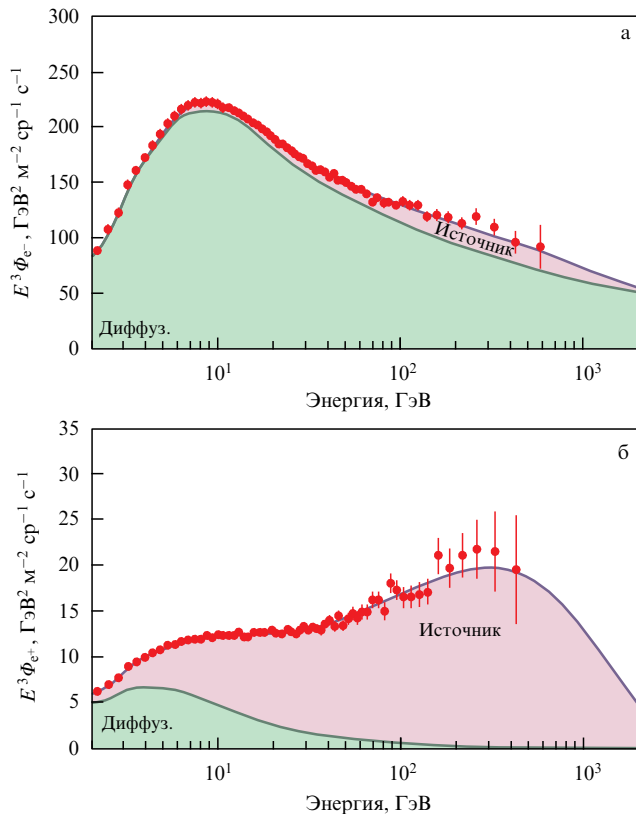


Рис. 22. (В цвете онлайн.) Вклады спектров минимальной модели в энергетическую зависимость электронов (а) и позитронов (б).

характер вкладов совершенно другой: превалирует диффузионный член. На рисунке 22 видна аналогичная картина в спектрах электронов и позитронов, снова основной вклад в спектр позитронов вносит спектр источника, а в электроны — диффузионный член.

Посмотрим, как "стандартные" представления о происхождении и распространении электронов и позитронов в космических лучах согласуются с только что нарисованной картиной. Механизм ускорения космических лучей в расширяющихся нерелятивистских ударных волнах, возникших при взрыве сверхновой, предсказывает для энергетических спектров частиц степенной закон с обрезанием при высоких энергиях:

$$C \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-\gamma} \exp \left(-\frac{E}{E_s} \right), \quad (2)$$

что в точности соответствует спектру "источника" на рис. 21, 22. Спектральный индекс γ обычно оказывается приблизительно равным 2, хотя и с большой неопределённостью. Диффузионный член характерен наличием степенной энергетической зависимости и отсутствием экспоненциального обрезания, т.е. снова выбранная форма спектра вторичных позитронов и электронов (см. рис. 21, 22) соответствует ожиданиям "стандартных" схем. Если принять всерьёз минимальную модель, то из рис. 21, 22 следует, что спектр позитронов является в основном спектром источника, т.е. позитроны оказываются первичными частицами, а электроны в большинстве своём — вторичными частицами, в полном противоречии с ожиданиями. Данные АМС (см. рис. 18, 19) исключают возможность объяснить рост доли позитро-

нов с увеличением энергии ошибками эксперимента или статистическими флуктуациями. Поэтому сразу после публикации результатов АМС-02 появилось большое число работ, объясняющих этот рост, сейчас их число превысило несколько сотен. Само это количество говорит о том, что убедительного объяснения всё ещё нет.

5.1.2. Стандартная картина. Рассмотрим вкратце некоторые физические предположения, которые, в принципе, позволяют количественно воспроизвести избыток позитронов.

1. В рамках стандартной картины можно ввести естественное ускорение возникших, т.е. вторичных, позитронов в той же области, где ускоряются первичные электроны, что может приводить к избытку позитронов высоких энергий [47].

2. Другая возможность используется в работе [48], где предполагается, что избыток позитронов вызван недавним и недалёким от нас взрывом сверхновой в плотном газовом облаке. Электроны и позитроны рождаются в адронных взаимодействиях внутри облака, их спектр жёстче, поскольку в этой схеме сверхновая проводит больше времени в излучающей фазе. Расчёты по этой модели при подходящем подборе параметров дают согласующиеся с АМС-02 результаты.

3. Аналогичная модель рассмотрена в работе [49]. Первичные электроны, как и другие первичные частицы, ускоряются только в плазме ударной волны, вторичные позитроны возникают в результате адронных столкновений внутри источника и могут ускоряться в области размерами порядка диффузионной длины, что приводит к более жёсткому спектру. Это и лежит в основе наблюдаемого избытка позитронов.

4. Однако не только позитроны, но и другие вторичные частицы тоже будут ускоряться, что приведёт к росту отношений бор/углерод и антипротоны/протоны. Детальный анализ показывает, что если более 25% позитронов высокой энергии являются вторичными позитронами, ускоренными в ударных волнах остатков сверхновой, то модель не может быть согласована с наблюдаемым отношением В/С. Критическим, однако, является отношение антипротоны/протоны. Поскольку мы не наблюдаем с увеличением энергии существенного роста отношения антипротоны/протоны, это с большой вероятностью исключает всякую ещё остающуюся возможность того, что рост доли позитронов происходит в результате ускорения вторичных позитронов в ударных волнах [50].

5. В модели Nested Leaky-box (NLB, встроенные области с утечкой энергии) [51] частицы ускоряются большим количеством источников, рассеянных в Галактике. Каждый источник окружён коконообразной областью, где и происходят взаимодействия и расщепление (spallation) ядер, но без нового ускорения.

Общепринятая модель распространения космических лучей предполагает пространственно гладкое и постоянное во времени распределение источников, посылающих космические лучи в межзвёздную среду. Предполагается, что космические лучи диффундируют в Галактике с коэффициентом диффузии (K), увеличивающимся с увеличением энергии $\sim E^2$. Вторичные ядра, образованные в результате взаимодействия первичных ядер со средой, также диффундируют с подобным коэффициентом диффузии. Достигая высоты 500 пк, космические лучи вы-

текают из Галактики и теряются. Время их пребывания в Галактике уменьшается с ростом энергии, $\tau \sim 1/K \sim E^{-\alpha}$, указывая на быструю утечку энергичных частиц из Галактики. Спектр вторичных частиц убывает сильнее и отношения, такие как В/С, оказываются убывающими с ростом энергии функциями. Сильная корреляция спектров позитронов и ядер бора в этих моделях неизбежна. При энергиях выше 50 ГэВ такие спектры плохо согласуются с данными наблюдений. Модифицируя общепринятую модель с учётом того, что позитроны содержат только 3–5 % энергии исходного протона, в то время как вторичные ядра, например бора, содержат до 100 % энергии на нуклон исходного ядра, а также учитывая дискретное, а не однородное распределение источников, оказалось возможным согласовать с наблюдениями зависимость доли позитронов от энергии во всём исследованном интервале (рис. 23а). Однако зависимость от энергии убывающего отношения В/С при высоких энергиях описывает эксперимент гораздо хуже. А именно, как видно из рис. 23б, при удовлетворительном воспроизведении роста доли позитронов для В/С при высоких энергиях вместо убывающей функции получается, скорее, константа. При существующих ошибках эксперимента говорить о прямом противоречии трудно, однако, видимо, с моделью нужно ещё работать.

5.1.3. Пульсары. Пульсары — это быстро вращающиеся нейтронные звёзды, которые постоянно переводят кинетическую энергию вращения в радиоизлучение, γ -лучи и

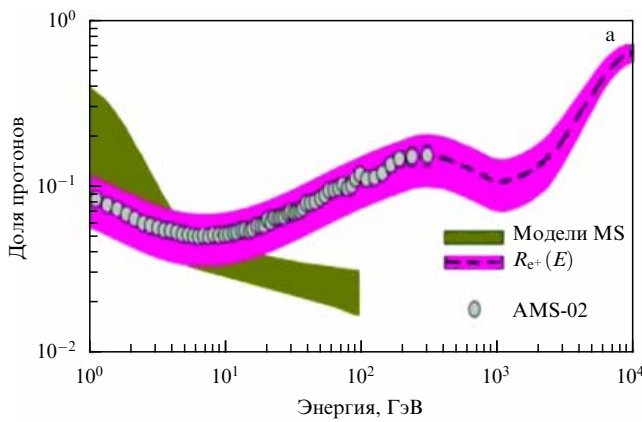


Рис. 23. (В цвете онлайн.) (а) Зависимость доли позитронов от энергии для общепринятой модели (зелёная кривая) и для её модификации (фиолетовая кривая) [51] в сравнении с результатами АМС-02. (б) Отношение В/С из работы [51].

космические лучи, включая электрон-позитронные пары высоких энергий. Энергетические спектры электронов и позитронов параметризуются следующим образом:

$$\frac{dN}{dE} \sim E^{-\alpha} \exp\left(-\frac{E}{E_c}\right).$$

Параметры имеют большую неопределённость: $\alpha = 1,5-2,0$ и $E_c = 80-1000$ ГэВ. В численных расчётах [52] предполагается, что 16 % полной энергии пульсаров переходит в частицы высоких энергий.

Энергетическая зависимость доли позитронов, полученная из суммы вкладов всех пульсаров Млечного Пути и приведённая на рис. 24, показывает, что при разумном выборе параметров вполне можно описать результаты АМС-02.

В работе [53] для описания данных АМС используется вклад только близко расположенного пульсара (Моногем или Геминга). Результат показан на рис. 25 и является вполне удовлетворительным.

Наиболее полный анализ данных АМС-02 проведён в [54] по спектрам электронов, позитронов и доли позитронов с помощью модели, где учитываются все астрофизические компоненты, которые могут давать вклад в наблюдаемые потоки во всём доступном энергетическом интервале. Как обычно, рассматриваются два основных

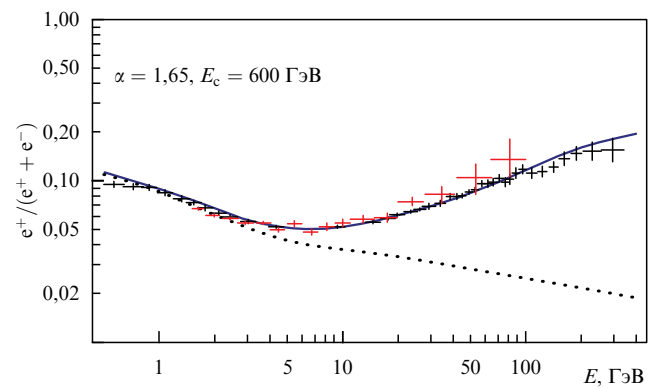


Рис. 24. (В цвете онлайн.) Энергетическая зависимость доли позитронов, полученная из суммы вкладов всех пульсаров Млечного Пути [52]. Данные АМС обозначены чёрными крестами, данные PAMELA — красными.

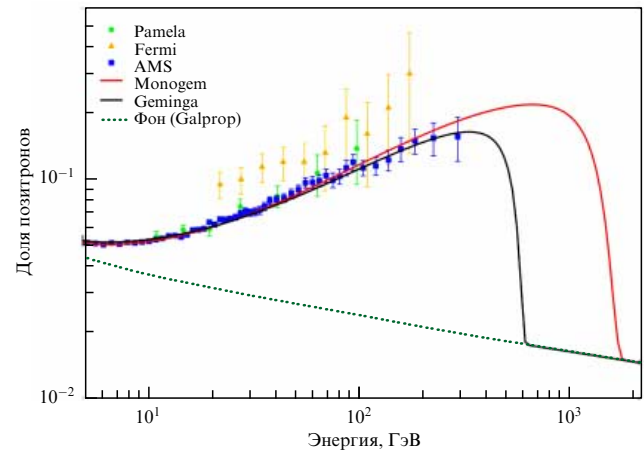


Рис. 25. (В цвете онлайн.) Энергетическая зависимость доли позитронов, полученная путём учёта вклада только одного близко расположенного пульсара (Моногем (розовый) или Геминга (чёрный) [53]).

астрофизических источника первичных электронов и позитронов — остатки сверхновых (SNR, SuperNova-Remnants) и пульсары (PWN, PulsarWindNebula).

Как всегда, предполагается, что SNR являются главными ускорителями заряженных частиц в нашей Галактике. Ускорение возникает в расширяющихся ударных волнах, возникающих при взрыве звезды, этот механизм приводит к возникновению степенных спектров с обрезанием при высоких энергиях (2).

Что касается пульсаров, то в области между ударной волной и выбросом звезды возникает "пузырь" горячей намагниченной плазмы, это и есть PWN. В режиме ускорения частицы захватываются магнитным полем PWN и находятся там, пока PWN существует. Спектр ускоренных частиц рассматривается в виде (2). Поскольку процессы, происходящие с частицами в пульсаре, плохо известны, существует большая неопределённость в параметрах, определяющих потоки электронов и позитронов, происходящих из пульсаров. Далее модель использована для описания данных АМС-02, причём фитировались одновременно спектры e^+ , e^- , $e^+ + e^-$ и $e^+/(e^+ + e^-)$. Результат приведён на рис. 26. Из рисунка видно, что весь комплекс лептонных спектров АМС-02 очень хорошо воспроизводится рассмотренной теоретической моделью с разумными параметрами. Как указывают авторы [54], он может быть описан с помощью известных астрофизических источников без привлечения новых, таких, например, как тёмная материя.

5.1.4. Тёмная материя. Результаты, изложенные в предыдущем разделе, делают вклад тёмной материи в

спектры лептонов более трудным и менее очевидным для её идентификации. Желательно найти особенности в спектре, однозначно указывающие на наличие вклада тёмной материи.

Приведём несколько примеров удачного описания данных АМС-02 с помощью различных сценариев аннигиляции и распадов тёмного вещества.

Начнём с работы [55], где экспериментально измеренная доля позитронов объясняется с помощью лептонных распадов гравитино. Описание данных вполне удовлетворительное (рис. 27а). Аналогичное исследование проведено в работе [56], где в качестве примера рассматриваются два сценария аннигиляции частиц тёмной материи. Снова приемлемое воспроизведение данных АМС-02 не вызывает трудностей (рис. 27б).

Ещё один пример — описание роста доли позитронов при высоких энергиях, который объясняется с помощью аннигиляции частиц тёмного вещества, так называемого "вино", в лептоны [57]. Результат представлен на рис. 27в. В работе [58] показано, что высокая точность АМС-02 требует для своего описания двухкомпонентного сценария распадающихся частиц тёмной материи. Результат показан на рис. 27г.

В работе [59] проведено исследование комбинированной модели, включающей основные астрофизические источники, а именно, остатки взрыва сверхновой (SNR) и пульсары (PWN), дополненные вкладом от практически всех сценариев тёмной материи, как с аннигиляцией, так и с распадом частиц. Наиболее примечательным результатом стало заключение, что частицы тёмной материи с массой около 50 ГэВ, аннигилируя в мюонный ка-

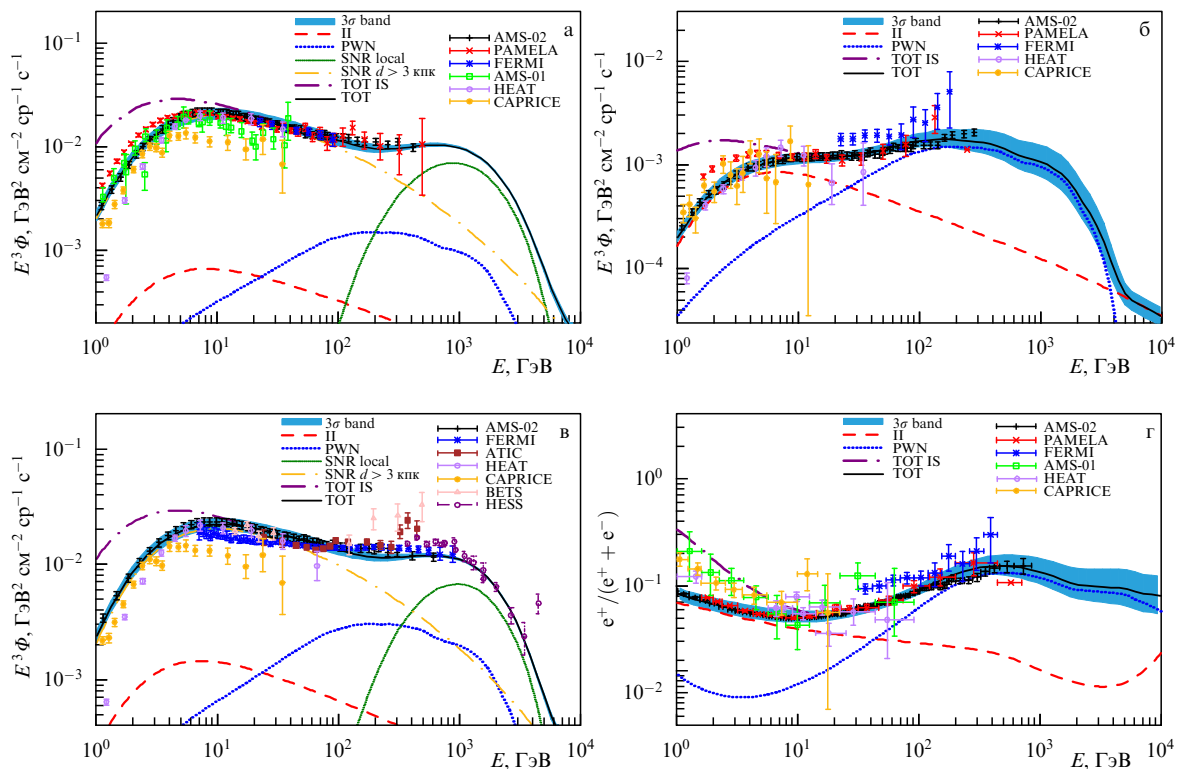


Рис. 26. (В цвете онлайн.) Результат одновременного фитирования [54] спектров e^- (а), e^+ (б), $e^+ + e^-$ (в), $e^+/(e^+ + e^-)$ (г), полученных в эксперименте АМС-02. Результат показан сплошной линией, жёлтая штрихпунктирная линия показывает вклад электронов далёких (> 3 кпк) SNR, зелёная пунктирная линия обозначает вклад электронов местных SNR, синяя линия (короткие штрихи) показывает вклад электронов и позитронов из пульсаров, а аналогичная красная линия с длинными штрихами — вклад вторичных электронов и позитронов. Вместе с данными АМС-02 приводятся также данные более ранних экспериментов: Fermi-LAT [38], Pamela [39], Heat [42], Caprice [41], Bets [46] и Hess [36].

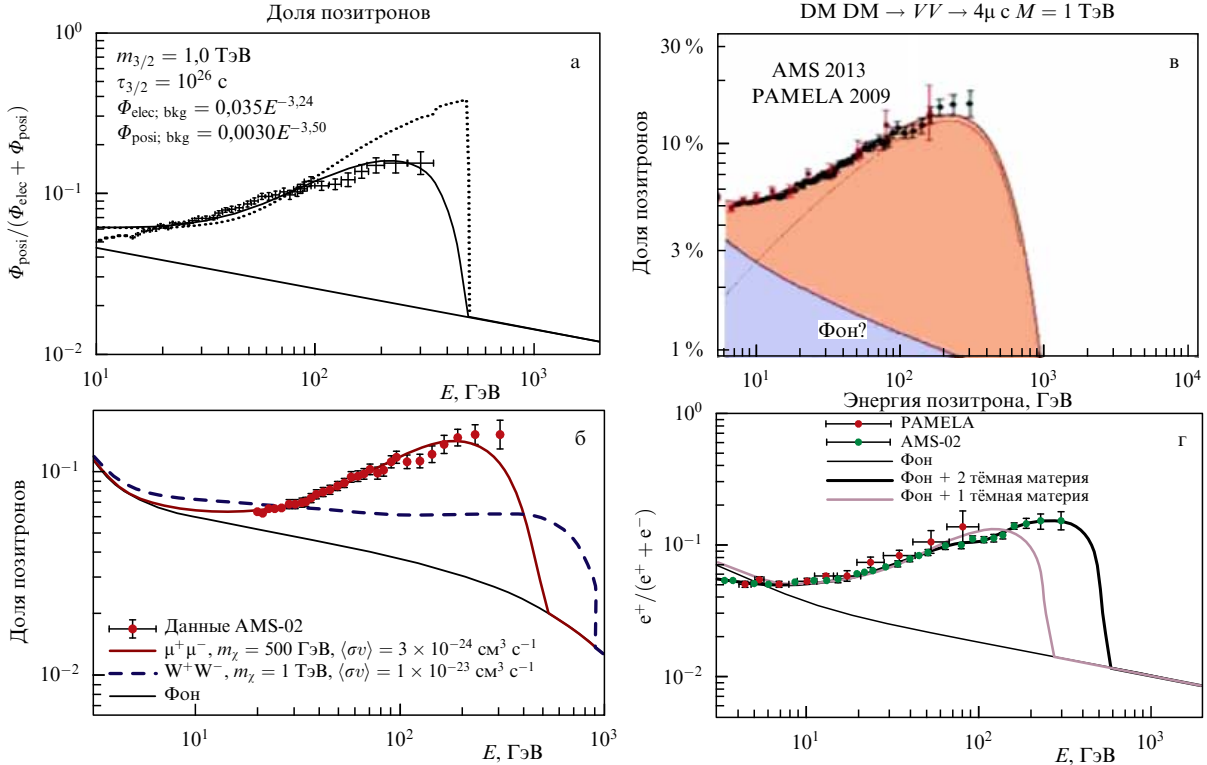


Рис 27. (В цвете онлайн.) (а) Доля позитронов, ожидаемая при распаде гравитино [55]. Красным цветом показаны данные АМС. (б) Сравнение данных АМС с двумя сценариями аннигиляции тёмной материи [56]. (в) Фитирование данных АМС помощью аннигиляции вино [57]. (г) Описание данных АМС с помощью распадов двухкомпонентного тёмного вещества [58].

нал с сечением, близким к равновесным тепловым значениям, будучи добавленными к вкладам пульсаров и вторичных частиц, дают исключительно хороший фит с данными АМС-02, гораздо лучший, чем удаётся получить с учётом только астрофизических вкладов. Результат для спектра и доли позитронов представлен на рис. 28.

5.1.5. Дополнительные замечания. Основываясь на работе [60], отметим следующее.

1. Тёмная материя с суперсимметричными частицами, аннигилирующими в лептонные каналы, очень хорошо воспроизводит данные АМС-02. Однако используемые для этого сечения аннигиляции слишком велики, на много порядков больше, чем нужно для тёмной материи, находившейся ранее в термодинамическом равновесии с получением ожидаемой сегодня космологической плотности. Для корректировки приходится вводить не-тепловой источник тёмного вещества.

2. Такие большие сечения могут превысить унитарный предел ($4\pi/m_\chi^2$) ($2J + 1$), где J — угловой момент, m_χ — масса частицы тёмной материи. Только $\mu^+\mu^-$ и $\tau^+\tau^-$ не противоречат унитарному пределу, а каналы b^+b^- и W^+W^- его явно нарушают.

3. В работе [61], где проведено исследование γ -излучения, включая излучение множества галактик-спутников Млечного Пути, получены (рис. 29) верхние пределы для сечения аннигиляции тёмного вещества. И, хотя и с большими неопределённостями, они исключают аннигиляцию тёмного вещества вплоть до масс 27–37 ГэВ в зависимости от канала.

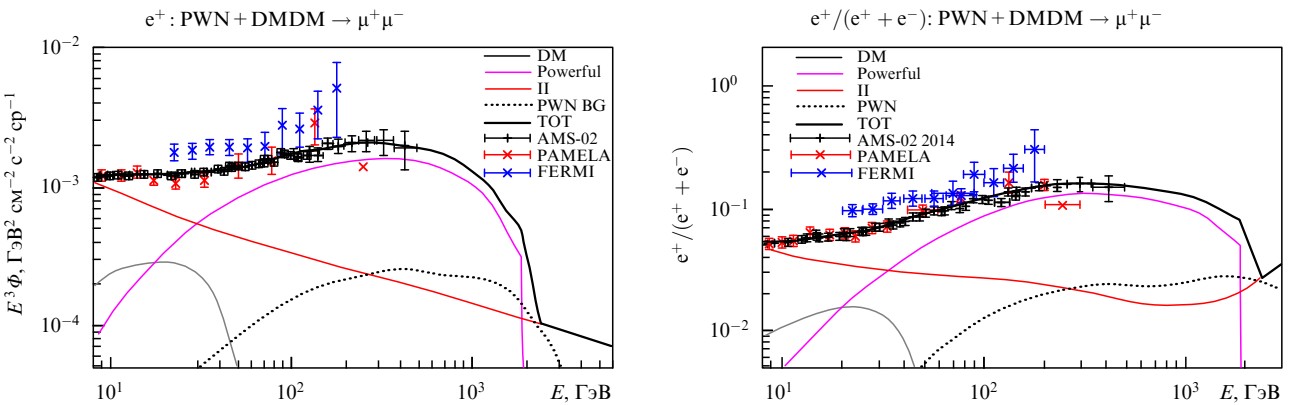


Рис 28. Наилучший фит АМС данных (спектры e^+ и $e^+/(e^+ + e^-)$) в комбинированной модели, включающей астрофизические источники, а также все сценарии тёмной материи с распадом и аннигиляцией в лептоны [59].

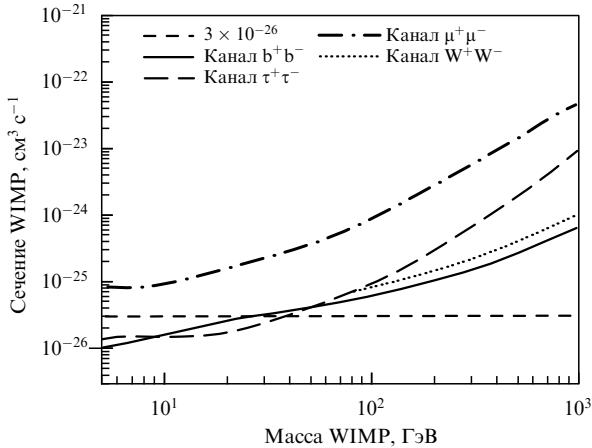


Рис. 29. Верхние пределы сечения аннигиляции тёмного вещества из анализа γ -излучения [61].

5.2. Результаты по спектру протонов и гелия

Протоны — самая многочисленная компонента космических лучей, которая, в силу важности для понимания их происхождения и распространения, измерялась многократно в течение многих лет и даже десятилетий. Точность измерений постепенно улучшалась, но всё ещё не была достаточной для убедительного сравнения и выбора теоретической модели. Мы будем сравнивать данные АМС с недавними результатами.

При высоких энергиях спектр становится более жёстким, показатель меняется и требуется модификация модели, причём результаты эксперимента PAMELA указывали на возможное существование сложной структуры в спектрах протонов и гелия при энергиях в несколько сотен ГэВ.

Измерения АМС-02 радикально изменили картину. На рисунке 30 приведены результаты АМС-02 для протонов [31] и гелия [32] в сравнении с недавними данными [35, 62–64]. Измерения выполнены в диапазоне энергий (жёсткостей) 1 ГВ–1,8 ТВ (р) и 1,9 ГВ–3 ТВ (He), на статистике 300 млн событий протонов и 50 млн событий гелия.

На рисунке 31 приведены данные АМС, умноженные на $R^{2,7}$, для протонов (а) и гелия (б) в сравнении с недавними результатами. Понятно, что описать данные АМС в традиционной манере с единой степенной функцией невозможно. Для количественной оценки выбран двукратный степенной закон с плавным изменением γ при переходе от меньших энергий к более высоким, поскольку он хорошо описывает наши данные. Спектр фитировался функцией (в диапазоне $45 \text{ ГВ} < P < 18 \text{ ТВ}$)

$$\Phi = C \left(\frac{R}{45 \text{ ГВ}} \right)^\gamma \left[1 + \left(\frac{R}{R_0} \right)^{\Delta\gamma/s} \right]^s, \quad (3)$$

где s характеризует гладкость перехода γ для жёсткостей ниже характерной переходной величины R_0 к $\gamma + \Delta\gamma$ для данных выше R_0 . Результаты фитирования дают $\chi^2/(\text{число степеней свободы}) = 25/26$ с параметрами (их ошибки даны в [31]): $C = 0,45$, $\gamma = -2,89$, $\Delta\gamma = 0,133$, $s = 0,024$, $R_0 = 336 \text{ ГВ}$. Результаты для протонов и гелия показаны на рис. 31. Описание данных единой степенной функцией R^γ невозможно с уровнем достоверности 99,9 %, причём для иллюстрации приведена также пунктирная кривая с $\Delta\gamma = 0$.

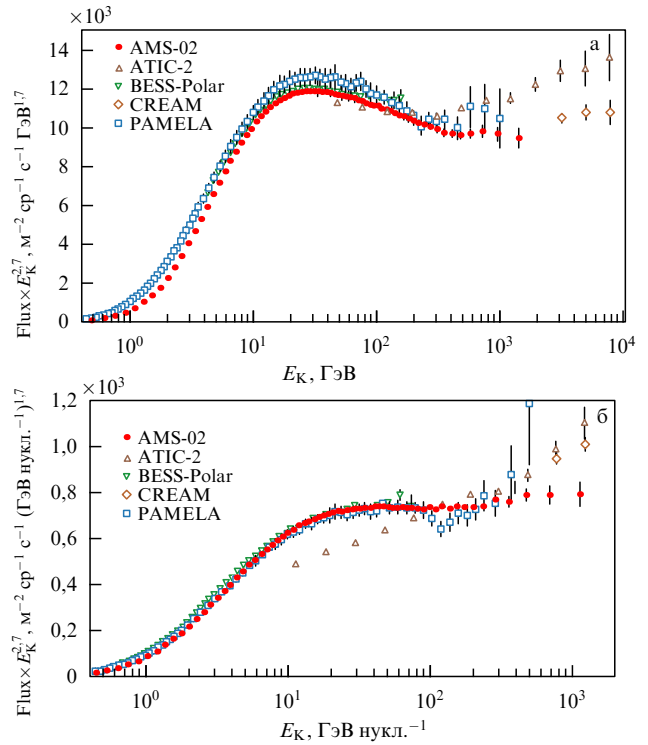


Рис. 30. Спектр протонов (а) и He (б) в сравнении с недавними измерениями. E_K — кинетическая энергия.

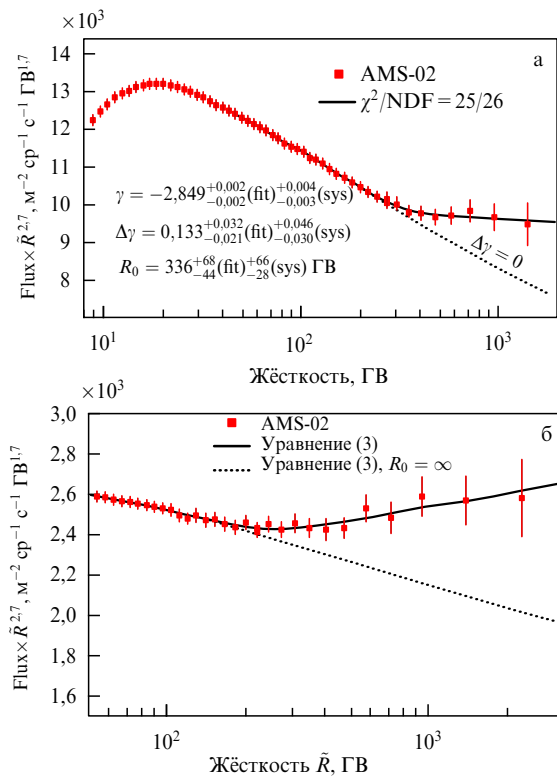


Рис. 31. Аппроксимация протонного (а) и гелиевого (б) спектра степенной функцией. Потоки умножены на жёсткость (rigidity) в степени 2,7. NDF — число степеней свободы.

Отметим следующее. Измеренные АМС доля протонов, спектры протонов и гелия указывают, что изменение характера поведения спектров происходит при приблизительно одинаковой энергии. Величины переход-

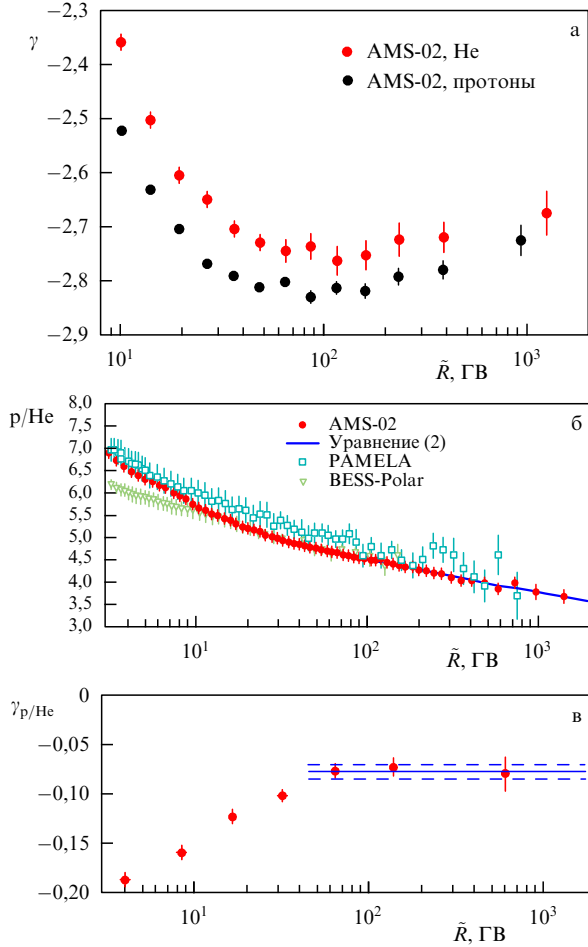


Рис. 32. (а) Вариация с энергией показателей спектра протонов и гелия. (б) Зависимость от энергии отношения потоков протонов и гелия (отношение p/He). (в) Зависимость от энергии спектрального индекса отношения p/He .

ной жёсткости R_0 для протонов ($R_0 = 336 \pm 94$) и гелия ($R_0 = 245 \pm 48$) близки, а также близки к энергии максимума доли позитронов 275 ± 32 ГэВ.

На рисунке 32а для протонов и гелия приводится вариация γ с энергией, подсчитанная по формуле

$$\gamma = \frac{d(\log \Phi)}{d(\log R)}.$$

Из рисунка видно, что показатель степени меняется с изменением энергии, становясь более жёстким выше ~ 100 ГВ.

Для понимания разницы энергетической зависимости спектров протонов и гелия мы приводим на рис. 32б зависимость от энергии отношения потоков протонов и гелия (отношение p/He) и на рис. 32в зависимость от энергии спектрального индекса отношения потоков протонов и гелия $\gamma_{p/\text{He}}$. Как видно из рис. 32б, выше $\cong 45$ ГВ данные АМС хорошо описываются выражением (2) с постоянным показателем $\gamma_{p/\text{He}}$ и, как следует из рис. 32в, спектральный индекс $\gamma_{p/\text{He}}$ растёт с увеличением энергии вплоть до значения $\cong 45$ ГВ и дальше не меняется.

5.3. Антипротоны

При анализе данных, как обычно, предполагается, что антипротоны — это вторичные частицы, т.е. происходят от взаимодействий первичных частиц, рождённых и

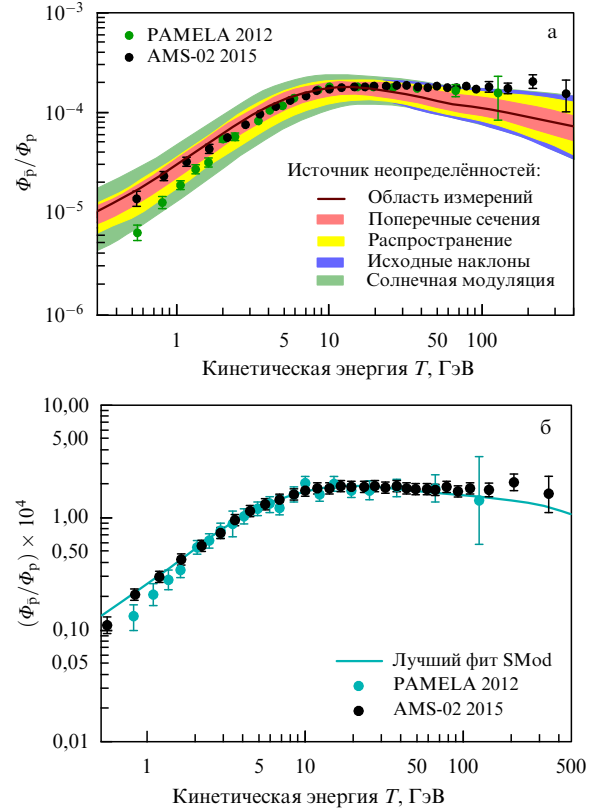


Рис. 33. (В цвете онлайн.) (а) Вклад различных неопределённостей в вычисление астрофизического фона [66]. (б) Наилучший результат фитирования данных АМС.

ускоренных в источнике, с веществом межзвёздной среды. Как показано в работе [65], вклад вторичных частиц вполне достаточен для объяснения наблюдаемого спектра, никаких дополнительных компонент кроме стандартного астрофизического фона не требуется. Более детальный анализ проведён в работе [66], где исследованы неопределённости вычислений и показано, что консервативная оценка этих неопределённостей составляет суммарно от 20 % до максимум 50 %. Результат показан на рис. 33а, а на рис. 33б показан наилучший результат фитирования данных АМС [33]. Основной вывод сохраняется: никакого увеличения доли антипротонов не наблюдается, стандартный астрофизический фон вполне прилично описывает новые данные.

6. Дискуссия и заключение

Подведём итоги. После первых наблюдений в экспериментах АМС-01, более точных PAMELA и более поздних FERMI-LAT прецизионные данные АМС-02 подтвердили окончательно: при высоких энергиях отношение позитронов к электронам увеличивается с увеличением энергии, а в прочно установившейся ранее теоретической картине должно было уменьшаться. Позитроны считались вторичными частицами, т.е. они возникали за пределами источника космических лучей, за пределами зоны ускорения, их спектр ожидался более мягким, чем спектр электронов. В реальности измеренные АМС спектры электронов и позитронов оказались другими: спектр e^+ более жёсткий, спектральный индекс $\gamma \cong -2,86$, а для e^- $\gamma \cong -3$. Такая картина больше соответствует тому, что электроны — это вторичные частицы, а

позитроны — первичные, т.е. ускорявшиеся в источнике. Для ещё большего усложнения картины добавим сюда убывающий спектр отношения В/С, что и ожидается в привычной схеме. Согласовать поведение В/С с позитронами пока не удаётся. После открытия неожиданного поведения позитронов появился ряд моделей, где предсказывался аналогичный рост отношения антипротонов к протонам. Однако измерения никакого роста антипротонов не обнаруживают, и это только добавляет трудностей при согласовании всей картины.

Одной из важнейших целей физической программы исследований АМС является обнаружение тёмной материи в её негравитационных проявлениях. Сейчас мы понимаем, что с помощью аннигиляции и/или распадов нейтрально в лептонные каналы можно количественно с хорошим χ^2 объяснить обнаруженные зависимости в позитронах и электронах. Ещё лучшим оказывается описание, если к тёмной материи добавить астрофизические источники, такие как остатки взрывов сверхновых и пульсары. В этих условиях можно рассчитывать идентифицировать тёмное вещество, если в энергетическом спектре будут обнаружены характерные особенности. Например, ожидается, что вклад нейтрально резко уменьшается за пределами области, соответствующей массе нейтрально.

Автор благодарен Андрею Кунину, Василию Пляскину и Виталию Шутко за ознакомление с рукописью и ценные замечания, автор также признателен Самюэлю Тингу за поддержку.

Список литературы

- Ahlen S et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **350** 351 (1994)
- Olive K A et al. (Particle Data Group) *Chin. Phys. C* **38** 090001 (2014)
- Dolgov A D *Phys. Rep.* **222** 309 (1992)
- Jungman G, Kamionkowski M, Griest K *Phys. Rep.* **267** 195 (1996)
- Ting S *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **243** 12 (2013); Chung C H et al. (The AMS Collab.) "AMS on ISS Construction of a particle physics detector on the International Space Station", <http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~deboer/html/Forschung/AMS.pdf>, unpublished (2007)
- Kounine A *Int. J. Mod. Phys. E* **21** 1230005 (2012)
- Aguilar M et al. (AMS Collab.) *Phys. Rep.* **366** 331 (2002)
- Pauluzzi M *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **473** 67 (2001)
- Casadei D et al. *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **113** 233 (2002); astro-ph/0206021; Alvisi D et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **437** 212 (1999)
- von Doetinchem Ph et al. *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **197** 15 (2009); arXiv:0811.4314
- Galaktionov Yu V *Rep. Prog. Phys.* **65** 1243 (2002)
- Alcaraz J et al. (AMS Collab.) *Phys. Lett. B* **461** 387 (1999)
- Alcaraz J et al. (AMS Collab.) *Phys. Lett. B* **472** 215 (2000)
- Plyaskin V *Astropart. Phys.* **30** 18 (2008)
- Alcaraz J et al. (AMS Collab.) *Phys. Lett. B* **484** 10 (2000)
- Aguilar M (AMS-01 Collab.) *Phys. Lett. B* **646** 145 (2007)
- Alcaraz J et al. (AMS Collab.) *Phys. Lett. B* **494** 193 (2000)
- Alcaraz J et al. (AMS Collab.) *Phys. Lett. B* **490** 27 (2000)
- Blau B et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **12** 345 (2002)
- Pohl M, arXiv:1508.07759
- v. Deutinchem P et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **558** 526 (2006); astro-ph/0608641
- Casaus J *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **113** 147 (2002)
- Cervelli F et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **490** 132 (2002)
- Roe B P et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **543** 577 (2005)
- Basara L, PhD Thesis (Grenoble: École Doctorale Physique Grenoble, Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de Physique des Particules, 2014)
- Gilmore D G *Satellite Thermal Control Handbook* (El Segundo, Calif.: Aerospace Corp. Press, 1994)
- Aguilar M et al. (AMS Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **110** 141102 (2013)
- Accardo L et al. (AMS Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **113** 121101 (2014)
- Aguilar M et al. (AMS Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **113** 221102 (2014)
- Aguilar M et al. (AMS Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **113** 121102 (2014)
- Aguilar M et al. (AMS Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **114** 171103 (2015)
- Aguilar M et al. (AMS Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **115** 211101 (2015)
- Aguilar M et al. (AMS Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **117** 091103 (2016)
- Moskalenko I V, Strong A W *Astrophys. J.* **493** 694 (1998)
- Панов А Д и др. *Изв. РАН Сер. физ.* **73** 602 (2009); Panov A D et al. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **73** 564 (2009)
- Aharonian F et al. (H.E.S.S. Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **101** 261104 (2008)
- Borla Tridon D et al., in *32nd Intern. Cosmic Ray Conf., Beijing 2011*; <https://doi.org/10.7529/ICRC2011/V06/0680>; arXiv:1110.4008
- Ackermann M et al. (Fermi LAT Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **108** 011103 (2012)
- Adriani O et al. *Nature* **458** 607 (2009)
- Grimani C et al. *Astron. Astrophys.* **392** 287 (2002)
- Boezio M et al. *Adv. Space Res.* **27** 669 (2001)
- DuVernois M A et al. *Astrophys. J.* **559** 296 (2001)
- Golden R L et al. *Astrophys. J.* **457** L103 (1996)
- Torii S et al. *Astrophys. J.* **559** 973 (2001)
- Chang J et al. *Nature* **456** 362 (2008)
- Yoshida K et al. *Adv. Space Res.* **42** 1670 (2008)
- Blasi P *Phys. Rev. Lett.* **103** 051104 (2009)
- Fujita Y et al. *Phys. Rev. D* **80** 063003 (2009)
- Mertsch P, Sarkar S *Phys. Rev. D* **90** 061301(R) (2014)
- Cholis I, Hooper D *Phys. Rev. D* **89** 043013 (2014)
- Cowsik R, Burch B, Madziwa-Nussinov T *Astrophys. J.* **786** 124 (2014)
- Cholis I, Hooper D *Phys. Rev. D* **88** 023013 (2013); arXiv:1304.1840
- Linden T, Profumo S *Astrophys. J.* **772** 18 (2013); arXiv:1304.1791
- Di Mauro M et al. *JCAP* (04) 006 (2014); arXiv:1402.0321
- Ibe M et al. *J. High Energ. Phys.* **2013** (08) 29 (2013); arXiv:1304.1483
- Kopp J *Phys. Rev. D* **88** 076013 (2013); arXiv:1304.1184
- Cirelli M *Nucl. Phys. B* **813** 1 (2009); arXiv:0809.2409
- Kajiyama Y, Okada H, Toma T *Eur. Phys. J. C* **74** 2722 (2014); arXiv:1304.2680
- Di Mauro M et al. *JCAP* (05) 031 (2016); arXiv:1507.07001
- Spanos V C, arXiv:1312.7841
- Ackermann M et al. (The Fermi-LAT Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **107** 241302 (2011); arXiv:1108.3546
- Abe K et al. *Phys. Rev. Lett.* **108** 051102 (2012)
- Yoon Y S et al. *Astrophys. J.* **728** 122 (2011)
- Adriani O et al. *Science* **332** 69 (2011)
- Donato F et al. *Phys. Rev. Lett.* **102** 071301 (2009)
- Giesen G et al. *JCAP* (09) 023 (2015); arXiv:1504.04276

Search for antimatter and dark matter, precision studies of the cosmic rays fluxes on the international space station. AMS experiment. Results of four year exposure

Yu.V. Galaktionov. Massachusetts Institute of Technology (MIT), 77 Massachusetts Ave, Cambridge, MA02139, USA
E-mail: iouri.galaktionov@cern.ch

The results of the cosmic rays studies, obtained in the AMS experiment during 2011 – 2015 on the International Space Station, are given. The energy spectra of electrons and positrons at TeV-energies as well as precision measurements of fluxes were performed. The growth with energy of the positron fraction has been observed. Also the proton and Helium spectra have been obtained. A review of theoretical models with possible explanations of the observed phenomena is presented.

Keywords: outer space, orbit, experiment, cosmic rays, positrons, dark matter, protons, experimental setup, high energy

PACS numbers: 13.85.Tp, **14.60. – z**, **29.30. – h**, 75.50.Ww, **95.30. – k**, **95.55. – n**, 96.50.S – , **97.60. – s**, 98.58.Mj, 98.70.Sa

Bibliography — 66 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **187** (1) 45–64 (2017)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2016.03.037764>

Received 3 February 2016, revised 20 March 2016

Physics – Uspekhi **60** (1) (2017)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2016.03.037764>