

## ОБОЗРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

## Экспериментальные исследования антипротонов и лёгких антиядер в космических лучах

А.Г. Майоров, С.А. Роденко, К.С. Челидзе, Р.Ф. Юлбарисов

*В работе представлен обзор современных экспериментальных исследований античастиц — антипротонов, антинейтронов и ядер антигелия, — в составе космических лучей. Основное внимание уделено данным, полученным в результате прямых и косвенных измерений галактической компоненты; часть обзора посвящена изучению вторичных античастиц (альbedo), в т.ч. захваченных магнитным полем Земли в радиационные пояса. Для полноты представления приводится описание первых ускорительных экспериментов, в которых лёгкие антиядра были впервые обнаружены, что показало принципиальную возможность их существования в нашем мире. Рассматриваются результаты баллонных, спутниковых и наземных миссий, направленных на изучение энергетического спектра антипротонов в широком диапазоне энергий — от сотен МэВ до сотен ГэВ, включая косвенные оценки выше 1 ТэВ. Особое внимание уделено последним достижениям в поиске более тяжёлых антиядер, таких как антинейтроны и ядра антигелия, которые представляют значительный интерес в контексте исследований тёмной материи и барионной асимметрии Вселенной. Наконец, обсуждаются перспективные проекты дальнейших исследований с учётом текущих экспериментальных ограничений и технических вызовов.*

**Ключевые слова:** антипротоны, антиядра, источники антиядер, эксперименты по обнаружению антипротонов, космические лучи

PACS number: 96.50.S–

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2025.12.040063>

### Содержание

1. Введение (563).
  2. Открытие антипротонов на ускорителях частиц и в космических лучах (565).
    - 2.1. Получение антипротонов на ускорительных комплексах.
    - 2.2. Обнаружение антипротонов в космических лучах.
  3. Наблюдения антипротонов с энергиями от десятков МэВ до сотен ГэВ в космических лучах (572).
    - 3.1. Антипротоны в галактических космических лучах.
    - 3.2. Антипротоны в составе альbedo Земли.
  4. Поиск антипротонов с энергией больше 1 ТэВ (587).
    - 4.1. Tibet-ASγ. 4.2. CASA. 4.3. MACRO. 4.4. L3+C. 4.5. Tibet-III. 4.6. ARGO-YBJ. 4.7. HAWC. 4.8. Другие эксперименты.
  5. Антиядра с  $A > 1$  (594).
    - 5.1. Антигелий. 5.2. Антинейтроны. 5.3. Будущие эксперименты.
  6. Заключение (597).
- Список литературы (598).

### 1. Введение

В конце XIX – начале XX века при изучении ионизации газа в герметичных сосудах исследователи пришли к выводу о существовании неизвестного проникающего излучения. В 1900–1901 гг. Ч. Вильсон впервые высказал гипотезу о его внеземном происхождении. Эта гипотеза нашла подтверждение в 1909–1914 гг., когда в ходе независимых экспериментов на воздушных шарах В. Гесс и В. Кольхёрстер обнаружили систематическое увеличение ионизации с ростом высоты. Этот эффект указывал на то, что излучение приходит из космоса и поглощается атмосферой [1]. Термин "космические лучи" (cosmic rays), ставший сегодня общепринятым, был популяризован и введён в широкий научный обиход Р. Милликеном в 1925 г. [2]. Несколькими годами позднее Д.В. Скобельцын впервые осуществил прямое наблюдение космических частиц, зарегистрировав их треки в камере Вильсона [3–6].

Сегодня космическими лучами (КЛ) чаще всего называют частицы с энергиями выше нескольких МэВ, которые приходят из космоса на границу с атмосферой Земли [7–9]. Их можно классифицировать по происхождению: солнечные, ускоряющиеся в результате активных процессов на Солнце; галактические, источником которых являются сверхновые или другие астрофизические объекты в Галактике; и внегалактические, рождающиеся или ускоряющиеся в окрестностях внегалактических объектов и приходящие в Галактику из межгалактиче-

А.Г. Майоров, С.А. Роденко\*, К.С. Челидзе, Р.Ф. Юлбарисов  
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,  
Каширское шоссе 31, 115409 Москва, Российская Федерация  
E-mail: \*sarodenko@mephi.ru

Статья поступила 22 сентября 2025 г.,  
после доработки 25 ноября 2025 г.

ского пространства. Также к космическим лучам относят и частицы, рождённые уже перечисленными компонентами КЛ в атмосфере Земли.

Во время своего движения космические частицы меняют свою энергию и направление, распадаются, если нестабильны, или участвуют в упругих и неупругих взаимодействиях с межзвёздной или межгалактической средой, а также с фоновым излучением во Вселенной. Благодаря этим процессам от первичной компоненты возникают новые частицы, которые также могут достичь околоземного пространства и быть здесь зарегистрированы. Такие частицы называют вторичными. Существует, однако, и альтернативное разделение понятий первичные/вторичные космические лучи: согласно ему первичными называют все частицы, приходящие на верхнюю границу атмосферы Земли (независимо от их происхождения), а вторичными — частицы, образующиеся в результате взаимодействия первичных частиц с атмосферой.

Таким образом, информация о химическом составе и энергетическом спектре космических лучей позволяет исследовать как свойства их источников, так и определять характеристики межгалактической и межзвёздной среды, гелиосферы, магнитосферы и атмосферы Земли.

Сегодня известно, что основными компонентами космических лучей являются протоны (их около 90 % в общем потоке) и ядра гелия (около 8 %), также присутствуют более тяжёлые ядра (углерод, кислород, железо и др.) и электроны, которые составляют около 1 %. Помимо частиц материи в КЛ присутствуют и частицы антиматерии: позитроны [10], антипротоны [11, 12], обнаружены события-кандидаты в ядра антидейтерия и антигелия [13]. Согласно экспериментальным данным о потоках космических лучей, доля антипротонов по отношению к протонам составляет примерно от  $10^{-5}$  до  $10^{-4}$  в зависимости от энергетического диапазона [14, 15], а доля позитронов от  $10^{-3}$  до  $10^{-2}$  [16].

В представленном обзоре обсуждаются антипротоны, эксперименты по их поиску и наблюдению, а также кратко затрагиваются физические следствия полученных результатов.

Антипротоны обнаружены в космических лучах в 1979 г. независимо друг от друга научными группами В.А. Романова [11] и Р.Л. Голдена [12]. Впоследствии их результаты были подтверждены и уточнены в других экспериментах, например, в измерениях А. Баффингтона [17], экспериментах PBAR [18], LEAP [19, 20] и многих др. Здесь стоит отметить, что самые ранние измерения потока антипротонов были проведены А. Баффингтоном [21], однако сегодня его результаты считаются ошибочными.

Уже в ранних работах зафиксировано превышение отношения потоков антипротонов к протонам над ожидаемыми значениями, получающимися в предположении только вторичного происхождения антипротонов [22–30]. Это могло свидетельствовать о существовании дополнительных источников античастиц, в качестве которых тогда рассматривались крупные структуры из антиматерии во Вселенной или различные внегалактические объекты [22, 31, 32]. К тому времени Х. Альвен предложил механизм сосуществования антиматерии и материи [33], поэтому новые экспериментальные сведения породили серьёзный интерес в научном сообществе к этой теме.

Современные теоретические модели, описывающие происхождение антипротонов, предполагают, что их источниками могут являться: известные астрофизические объекты [34], испарение первичных чёрных дыр [32, 35], частицы тёмной материи [22, 31, 36, 37].

Энергетический спектр антипротонов, рождающихся в результате указанных процессов, претерпевает изменения по мере их движения от источников до области наблюдения. Исследование спектров антипротонов в космических лучах вызвало интерес научного сообщества с момента их открытия. Первые эксперименты, проведённые в конце XX века, выявили превышение наблюдаемого потока антипротонов в области низких энергий по сравнению с предсказаниями теоретических моделей, основанных на вторичном рождении частиц в результате взаимодействия КЛ с межзвёздной средой [25–30]. Это несоответствие стимулировало активное изучение альтернативных механизмов генерации антипротонов, включая гипотезу о существовании первичных источников античастиц. Даже после того, как экспериментальные данные стали согласовываться со стандартной моделью "leaky-box" [38], поиск альтернативных объяснений продолжался. В частности, были предложены различные сценарии первичного происхождения антипротонов [36, 39, 40–42], среди которых особое внимание уделялось суперсимметричным теориям (SUSY) и попыткам ограничить их параметры с помощью космических наблюдений.

Кроме этого, значительный интерес представляют и антипротоны сравнительно низких энергий (до десятков ГэВ). Например, их точные и долговременные измерения позволяют изучать эффект солнечной модуляции, т.е. влияние Солнца и солнечной активности на потоки галактических частиц в гелиосфере. Одной из интересных особенностей солнечной модуляции является её зарядовая зависимость, когда вариации потоков частиц связаны с их знаком заряда и полярностью солнечного магнитного поля [43]. Также благодаря измерениям потоков антипротонов удастся получить новые сведения о модуляционном гистерезисе, зависимости длин пробега от магнитной жёсткости частиц, фазы солнечного цикла и др. [44, 45].

Наконец, в 2011 г. антипротоны были открыты в составе альbedo Земли и захваченных во внутреннем радиационном поясе частиц [46]. Долгое время они оставались в тени научных исследований и, хотя хорошо известно, что вторичные частицы и античастицы образуются в околоземном пространстве в неупругих реакциях взаимодействия космических лучей с атмосферой Земли, основное внимание уделялось изучению электронов и позитронов. Тем не менее теоретические работы о потоках вторичных антипротонов тоже выполнялись, и с их помощью удалось глубже понять механизмы генерации частиц альbedo, в т.ч. в прямом рождении и посредством CRAND/CRANbarD (Cosmic Ray Albedo Neutron/antiNeutron Decay, пер. с англ. распад нейтронов альbedo космических лучей), а также условия захвата и удержания заряженных частиц в магнитосфере Земли [47–50].

Антиядра с  $A > 1$  в космических лучах, такие как антидейтроны ( $\bar{d}$ ) и ядра антигелия ( ${}^3\bar{\text{He}}$ ,  ${}^4\bar{\text{He}}$ ), тоже могут иметь вторичное происхождение, но при этом их распространённость в составе КЛ будет низкой. Превышение над предсказанными потоками вторичной компоненты этих антиядер может рассматриваться как косвенное

доказательство существования их экзотических источников, например, в форме гипотетических частиц тёмной материи [51, 52]. Поскольку потоки первичных космических лучей быстро падают с ростом энергии, ожидается, что потоки вторичных антиядер в КЛ будут подавлены в области высоких энергий, а значит, в качестве индикатора частиц тёмной материи стоит проводить поиск антиядер с кинетической энергией выше 1 ГэВ/нуклон.

## 2. Открытие антипротонов на ускорителях частиц и в космических лучах

Релятивистская теория, предложенная П. Дираком, объединила принципы специальной теории относительности и квантовой механики, что позволило предсказать существование античастиц [53]. Одним из ключевых предсказаний уравнения Дирака стало существование собственного момента импульса электрона (спина) и магнитного момента. Однако наиболее известным следствием стало появление двух решений уравнения: одно описывало известные электроны, а второе указывало на возможность существования частиц с массой электрона, но с положительным зарядом [54]. Это предсказание оставалось гипотетическим, пока К. Андерсон в 1932 г. не обнаружил позитрон, подтвердив таким образом существование античастиц [10].

Теория Дирака показала, что предсказанный им механизм справедлив не только для электрона, но и для всех субатомных частиц со спином 1/2, известных как фермионы [54]. Для проверки этой гипотезы в Беркли был построен ускоритель частиц, предназначенный для регистрации античастицы протона — антипротона. Его обнаружение стало важным шагом в развитии физики элементарных частиц и углублении понимания фундаментальной симметрии природы [55].

### 2.1. Получение антипротонов на ускорительных комплексах

В 1954 г. Э. Лоуренс курировал строительство протонного ускорителя под названием Беватрон в радиационной лаборатории в Беркли (штат Калифорния, США), который позволил ускорять протоны до энергии 6,2 ГэВ, что превышает пороговую энергию рождения антипротонов 5,6 ГэВ. Через год после этого, в ноябре 1955 г., О. Чемберлен, Э. Сегре и др. опубликовали статью, в которой объявили об открытии новой субатомной частицы, во всех отношениях идентичной протону, за исключением того, что её электрический заряд был отрицательным, а не положительным [55]. Обнаружение антипротона на ускорителе вызвало широкий общественный резонанс, и за месяц до появления научной статьи The New York Times разместила новость на первой странице: "Found New Atom Particle; Termed a Negative Proton". С открытием антипротона было получено ещё одно доказательство существования симметрии между материей и антиматерией, на поиск которой были направлены последующие эксперименты. Э. Сегре и О. Чемберлен были удостоены Нобелевской премии по физике в 1959 г. "за открытие антипротона".

В экспериментах О. Чемберлена и Э. Сегре пучки протонов, достигнув энергии 6,2 ГэВ, достаточной для создания пары протон–антипротон в реакции  $p + p \rightarrow p + p + p + \bar{p}$ , сталкивались с медной мишенью [55]. Используемый метод идентификации был основан на

определении массы отрицательно заряженных частиц, рождённых в медной мишени ускорителя при столкновении с ней протонного пучка. Для подтверждения того, что в этой реакции действительно рождаются антипротоны, была измерена энергия образовавшихся в результате аннигиляции продуктов. Для этого после сцинтилляционного счётчика был помещён ещё один черенковский счётчик, который позволил зарегистрировать скорость продуктов аннигиляции антипротона. Ожидалось, что при аннигиляции нуклона и антинуклона в покое будет выделяться энергия, равная удвоенной энергии покоя нуклона (около 1,9 ГэВ). Действительно, удалось обнаружить, что при прохождении антипротонов через детектирующую систему в черенковском счётчике выделяется сигнал, амплитуда которого превышала 1 ГэВ.

Результаты были подтверждены в усовершенствованном эксперименте О. Чемберлена [56, 57], где аннигиляцию антипротона с одним из протонов эмульсионной камеры регистрировали по следам в стопке фотоэмульсий (рис. 1). Заряженная частица, проходя через фото-

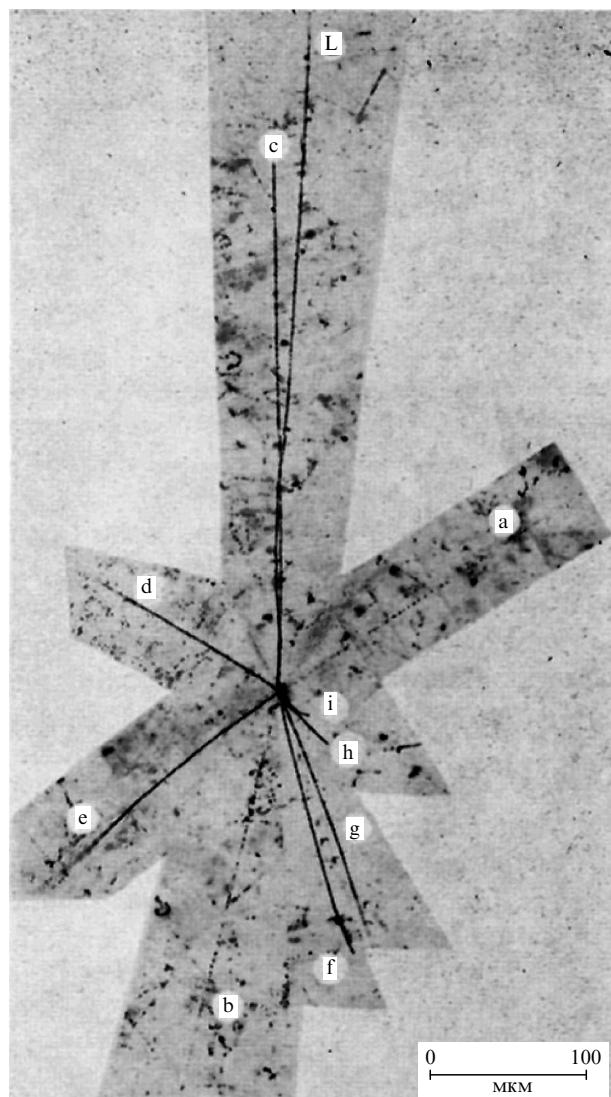


Рис. 1. Восстановленное изображение аннигиляции антипротона (звезда). L — трек антипротона. Надёжно определены были только треки b и c как пион и протон соответственно. Остальные определены с меньшей достоверностью и, как предполагалось, являлись протонами, а трек a — пионом [56].

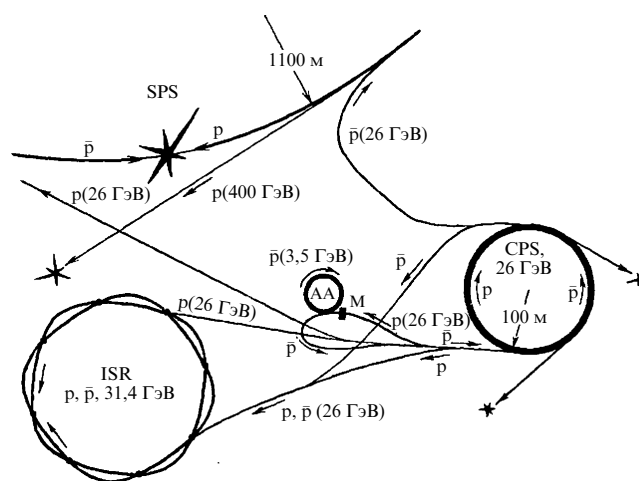
эмульсию, ионизует атомы вещества вдоль траектории, и после проявления это даёт видимый трек. При замедлении частицы её ионизирующая способность возрастает, поэтому участки трека перед остановкой выглядят более плотными и тёмными, что используют для идентификации типа частицы. Аннигиляция антипротона сопровождается выделением энергии, переходящей в кинетическую энергию вторичных частиц (пионов, протонов и др.), которые формируют характерную "звезду" из множества треков, выходящих из одной вершины взаимодействия. Сравнение суммарной энергии вторичных частиц с ожидаемой энергией, соответствующей аннигиляции антипротона на ядре, позволяет надёжно отнести событие к аннигиляции антипротона.

Ионизация, создаваемая частицей антипротоном, и величина углового рассеяния в материале эмульсии измерялись независимо, что позволило определить массу частицы с высокой точностью. Первый метод, основанный на измерении ионизации, регистрируемой по плотности зёрен на треке частицы в эмульсии, дал возможность оценить её скорость и энергию. Дополнительно был использован пробег частицы — расстояние, пройденное ею до полной остановки, что позволило уточнить массу. Второй метод заключался в измерении углового рассеяния частицы на различных участках её трека, что предоставило информацию о её импульсе и, следовательно, массе. Дополнительно, для уточнения массы, использовался метод, основанный на измерении остаточного пробега и магнитной жёсткости, который позволил определить импульс частицы по её траектории в магнитном поле и сопоставить его с пройденным расстоянием в материале эмульсии. В результате применения этих методов было получено отношение массы антипротона и протона, равное  $1,010 \pm 0,034$ . Эти эксперименты подтвердили существование антипротонов в природе, открыв путь к активному изучению антиматерии на ускорительных комплексах.

В 1956 г., менее чем через год после обнаружения антипротонов, группа исследователей под руководством Б. Корка, работавшая на Беватроне, успешно использовала антипротоны для получения антинейтронов. Антинейтроны появлялись в реакции столкновения пучков протонов и антипротонов:  $\bar{p}p \rightarrow \bar{p}n$  [58]. Заметим, что эта реакция лежит в основе теорий, объясняющих происхождение антипротонов в околоземном космическом пространстве (подробнее в разделе 3.2).

Это открытие поставило перед научным сообществом новый вопрос: могут ли антипротоны и антинейтроны объединяться, образуя антиядра? Ответ на этот вопрос был получен в 1965 г., когда впервые были зарегистрированы антидейтроны — ядра антиматерии, состоящие из антипротона и антинейтрона. Этот результат был одновременно получен двумя независимыми группами исследователей: одна из которых, под руководством А. Зикики, использовала протонный синхротрон в ЦЕРН [59], а другая группа, под руководством Л. Ледермана, проводила эксперименты на ускорителе AGS в Брукхейвенской национальной лаборатории [60].

Совершенствование методов генерации антипротонов позволило начать детальные исследования протон-антипротонных столкновений. В 1964 г. был предложен проект протонной накопительной установки ISR (Intersecting Storage Rings), построенной в ЦЕРН в период с 1966 по 1971 гг. Изначально она разрабатывалась для



**Рис. 2.** Схема ускорительно-накопительного комплекса ЦЕРН к середине 1980-х годов. CPS — ускоритель протонов до энергии 28 ГэВ, инжектор протонов и антипротонов в ISR и SPS; ISR — накопитель сталкивающихся протон-протонных и протон-антипротонных пучков с энергиями 31,4 ГэВ; SPS — ускоритель протонов до энергии 570 ГэВ, накопитель сталкивающихся протон-антипротонных пучков с энергиями 270 ГэВ [65].

изучения упругого протон-протонного взаимодействия и получения новых частиц, но её строительство дало возможность накапливать антипротоны в одном из двух колец одновременно с накоплением протонов в другом [61]. Однако оставалась проблема — отсутствие интенсивного и монохроматического источника антипротонов, которая была решена позднее путём разработки методов электронного [62] и стохастического [63] охлаждения.

Следующая важная веха в исследовании античастиц была достигнута в ЦЕРН в 1978 г., когда в ходе эксперимента Initial Cooling Experiment (ICE) антипротоны, полученные в результате столкновения ускоренных в протонном синхротроне PS (Proton Synchrotron) протонов с вольфрамовой мишенью, удерживались в магнитной ловушке в течение 85 часов [64]. С этого момента начались крупномасштабные эксперименты с антипротонами высоких энергий.

Благодаря появившимся возможностям удержания, накопления и ускорения антипротонов основными задачами экспериментов 1980-х годов стали поиски частиц-переносчиков слабого взаимодействия, которые сейчас известны как  $W^\pm$ - и  $Z^0$ -бозоны, открытые на ускорителе SPS в январе и марте 1983 г. [66, 67]. В 1980 г. в ЦЕРН был построен антипротонный накопитель AA (Antiproton Accumulator), в котором удерживались антипротоны высокой энергии, рождённые в PS, для инжекции в более крупный большой протонный синхротрон SPS (Super Proton Synchrotron) [68–70]. Он стал первым построенным протон-антипротонным коллайдером. Схема ускорительно-накопительного комплекса ЦЕРН, работавшего в 1980-х гг., представлена на рис. 2. На 1985 г. энергия в системе центра масс сталкивающихся протонов и антипротонов в SPS достигала 540 ГэВ, что тогда являлось рекордным значением [65].

В 1982 г. в ЦЕРН построен детектор LEAR (Low Energy Antiproton Ring), который дополнил ускорительно-накопительный комплекс ЦЕРН и проработал до 1996 г. [71]. Специально для его создания в накопителе

антипротонов (АА) были адаптированы методы охлаждения: новым и наиболее эффективным оказался метод электронного охлаждения, что позволило достичь энергий 2 МэВ (импульс  $61 \text{ МэВ } c^{-1}$ ). При электронном охлаждении антипротоны за счёт столкновений передавали энергию согласованному по скорости (сопутствующему) электронному пучку, таким образом увеличение объёма их фазового пространства эффективно переносилось в фазовое пространство электронного пучка. А этот пучок, постоянно пополняемый холодными электронами из своего источника, уносил кинетическую энергию антипротонов. Типичные значения импульса пучков антипротонов, достигаемых в LEAR, составляли  $106 \text{ МэВ } c^{-1}$  (что соответствует энергии в 6 МэВ). В дополнение к этим возможностям замедления LEAR также мог повторно ускорять антипротоны с импульсом  $600 \text{ МэВ } c^{-1}$  до  $1,6 \text{ ГэВ } c^{-1}$ , что позволяло решать различные задачи, включая эксперименты по производству антиводорода [72, 73].

Команда во главе с У. Элертом в 1996 г. впервые синтезировала атомы антиводорода на установке LEAR в ЦЕРН [74]. Девять из этих атомов были получены в результате столкновений между антипротонами и атомами ксенона, каждый из которых существовал около 40 миллиардных долей секунды. Этот эксперимент стал первым успешным случаем объединения частиц антиматерии (антипротонов и позитронов) в атомы антиводорода, что представляет собой значительный прорыв в исследованиях антиматерии [74]. Данное достижение открыло новые возможности для проведения точных измерений свойств антиводорода [72], включая спектроскопические исследования [75–78] и проверку фундаментальных симметрий, таких как СРТ-инвариантность [78–81]. СРТ-инвариантность, предполагающая симметрию между частицами и античастицами относительно зарядового сопряжения (С), пространственной инверсии (Р) и обращения времени (Т), является ключевым элементом в понимании природы антиматерии и её отличий от обычной материи [82]. Проверка этой симметрии на уровне атомов антиводорода позволяет тестировать Стандартную модель физики элементарных частиц и искать возможные отклонения, которые могут указывать на новую физику за её пределами [78, 81].

Одновременно с экспериментами в ЦЕРН с 1983 г. производство пучков антипротонов началось в Национальной ускорительной лаборатории Ферми (Fermi National Accelerator Laboratory, Fermilab) [83]. Античастицы синтезировались для проведения экспериментов на протон-антипротонном коллайдере под названием Тэватрон, который оставался самым мощным ускорителем частиц в мире до 2009 г. Тэватрон представлял собой кольцевой ускоритель с длиной окружности 6,3 км, способный разгонять протоны и антипротоны до энергии 980 ГэВ (по 900 ГэВ на пучок). В начале работы коллайдера выход антипротонов в пучке по отношению к выходу протонов составлял около  $10^{-7}$ . Основной целью коллайдера было изучение фундаментальных свойств материи и антиматерии, включая поиск новых частиц и проверку предсказаний Стандартной модели.

Схема источника антипротонов Fermilab показана на рис. 3. Для получения пучка антипротонов в эксперименте Fermilab высокоэнергетические протоны из Главного кольца (Main Ring) бомбардировали неподвижную мишень. Эти антипротоны затем собирались, охлаж-

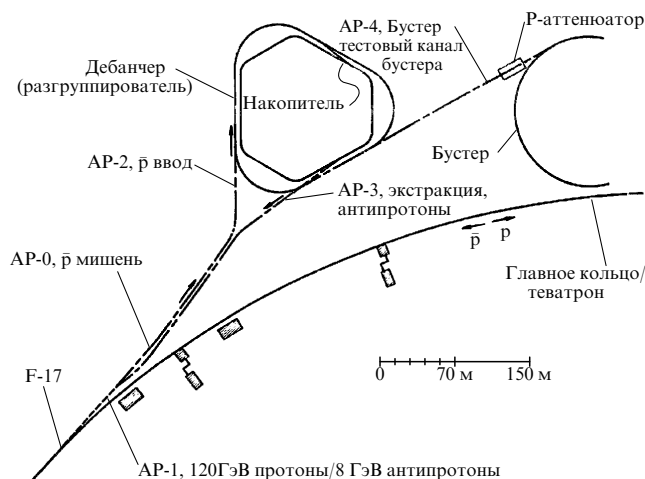


Рис. 3. Схема источника антипротонов Fermilab [84].

дались и накапливались в антипротонном накопителе перед инжекцией в Тэватрон.

Одним из ключевых достижений Fermilab стало открытие топ-кварка в 1995 г. на протон-антипротонном коллайдере Тэватрон [85, 86]. Антипротоны, сталкиваясь с протонами, создавали условия для рождения топ-кварков, которые распадались на W-бозоны и b-кварки. Продукты распада регистрировались CDF (Collider Detector at Fermilab) [87] и DØ (DZero) [88], что позволило впервые экспериментально подтвердить существование t-кварка. Это открытие стало важным шагом в физике элементарных частиц и подтвердило Стандартную модель.

Кроме открытия топ-кварка, эксперименты с антипротонами в Fermilab внесли вклад в изучение CP-нарушения и свойств W-бозонов. Например, коллаборация CDF провела прецизионные измерения асимметрии в распадах W-мезонов, что позволило уточнить параметры CP-нарушения и проверить предсказания Стандартной модели [89].

Также на ускорителе в лаборатории Fermilab [90] в 1998 г. посредством столкновений релятивистских антипротонов с водородной мишенью были получены атомы антиводорода. Это достижение открыло новые возможности для изучения свойств антиматерии и проверки фундаментальных симметрий, таких как СРТ-инвариантность [78, 81].

В настоящее время в ЦЕРН проводится эксперимент PUMA (antiProton Unstable Matter Annihilation), направленный на исследование поверхностных свойств стабильных и редких (нестабильных) изотопов [91]. В исследовании используются антипротоны низких энергий (диапазон эВ–кэВ), так как они обладают уникальной чувствительностью к распределению нейтронов и протонов в области аннигиляции, которая может происходить во внешней части ядра — "хвосте" распределения. В этой области плотность ядерной материи значительно снижается по сравнению с центральной частью; антипротоны захватываются ядром и аннигилируют с нуклонами на расстоянии около 2–2,5 фм от поверхности [91]. В результате образуются заряженные пионы, измерив характеристики которых можно определить соотношение нейтронов и протонов в этой области [72]. Кроме того, антипротоны особенно чувствительны к экзотическим структурам, таким как нейтронные гало [92, 93] и

нейтронные кожи [94, 95], которые проявляются именно в хвосте ядерной плотности [96, 97]. Это делает антипротоны мощным инструментом для изучения свойств ядерной материи в областях с низкой плотностью, недоступных для других методов.

Кроме того, проводятся эксперименты по детальному изучению свойств антиатомов. Антипротонные атомы образуются в результате захвата антипротонов низкой энергии в атомное состояние, где антипротон замещает выбитый электрон [73]. Процесс захвата регулируется атомными и молекулярными свойствами целевой среды, но до сих пор не изучен в деталях. Предполагается, что антипротон захватывается на высоковозбуждённую орбиталь с большим главным квантовым числом  $\sim 100$  для лёгких атомов [72]. В процессе каскадных переходов антипротон опускается на более низкие орбитали, пока не достигает области, где происходит аннигиляция с нуклонами. Точные детали этого процесса, включая радиус начальной орбиты захвата, требуют дальнейшего экспериментального и теоретического изучения [98].

Другим интересным направлением является проверка действия гравитации на антиматерию, для этого в эксперименте ALPHA [99, 100] используются установки Antiproton Decelerator (AD) [101, 102] и ELENA [103] в ЦЕРН. Благодаря успехам в получении атомов антиводорода ALPHA провёл первые точные измерения атомных переходов  $1S-2S$  и сверхтонкого спектра антиводорода [78]. На основании этих достижений коллаборация ALPHA планирует расширить программу, включив измерение гравитационного ускорения антиматерии. Новый эксперимент ALPHA-g [104], использующий усовершенствованные методы захвата и моделирования орбит антиводорода, нацелен на проверку слабого принципа эквивалентности с точностью до 1% [100, 105]. Недавние результаты эксперимента ALPHA-g показывают гравитационное притяжение между атомами антиводорода и Землёй [105].

Достижения в производстве, охлаждении и накоплении пучков антипротонов, а также получение антиматерии в ЦЕРН для выполнения высокоточных измерений [74–76, 100, 106, 107], наряду с новейшими разработками коллаборации PUMA [108] по транспортировке антипротонов, открывают новые возможности для исследований их влияния на биологические структуры и разработки технологий, направленных на использование антипротонов в борьбе с раковыми опухолями [109–111].

Таким образом, исследования антипротонов на ускорительных комплексах, начиная с их открытия на Беватроне, привели к значительным прорывам в физике элементарных частиц. Совершенствование методов генерации, охлаждения и накопления антипротонов позволило провести прецизионные эксперименты, включая поиск топ-кварка, изучение CP-нарушения и проверку CPT-инвариантности. Современные проекты, такие как PUMA и ALPHA-g, исследуют экзотические ядерные структуры, гравитационные свойства антиматерии и её возможное применение в медицине. Эти достижения подтвердили принципы Стандартной модели и открыли новые горизонты для поиска физики за её пределами.

## 2.2. Обнаружение антипротонов в космических лучах

Предположения о существовании антипротонов в космических лучах возникли вскоре после открытия этих

античастиц на ускорителе. Анализ восточно-западной асимметрии КЛ, наблюдаемой на низких геомагнитных широтах с помощью приборов, установленных на ракете-зонде "Аэроби" [112], привёл М.И. Фрадкина к выводу, что нельзя исключать наличие отрицательно заряженных частиц в первичном космическом излучении (не менее 13% от всех частиц) [113]. Однако отсутствие электронов в таком количестве побудило его теоретически оценить долю  $\bar{p}$  в космических лучах, которая, согласно его расчётам, составила 0,2%, что показало актуальность постановки специальных экспериментов для обнаружения этих античастиц. Более поздние расчёты с использованием измеренных сечений образования антипротонов при энергиях, доступных на ускорителях, показали, что ожидаемая доля  $\bar{p}$  примерно на порядок меньше этой ранней оценки [114]. В течение следующих двух десятилетий было предпринято много серьёзных попыток поиска источников античастиц, приходящих из космического излучения, с использованием детекторов с ядерной эмульсией и магнитных спектрометров.

Хотя первые эксперименты по регистрации космического излучения при помощи ядерных фотоэмульсий проводились уже в первой половине 1960-х гг. [115–117], систематические поиски античастиц с их применением начались лишь в конце 1960-х гг. [118]. Методика идентификации низкоэнергетических антипротонов заключалась в поиске событий, соответствующих их аннигиляции в веществе эмульсий [119].

В 1961 г. Х. Аизу и др. провели баллонный (аэростатный) эксперимент [115], в котором максимальная энергия регистрируемых частиц была ограничена толщиной эмульсии и не превышала 0,5 ГэВ/нуклон. Толщина остаточной атмосферы, через которую проходили частицы космического излучения перед достижением стопки фотографических эмульсий, оценивалась как  $7,6 \text{ г см}^{-2}$ . Исследуя точки остановки однозарядных ядер в эмульсии и предполагая, что все наблюдаемые ядра имеют космическое происхождение, они установили верхний предел на отношение потоков антипротонов к протонам  $\sim 3 \times 10^{-3}$ .

В 1960-х гг. Н.Л. Григоров и его коллеги провели измерения потоков космических лучей с помощью детекторов, установленных на искусственных спутниках Земли на высоте около 300 км [120, 121]. В ходе анализа данных, полученных при экспонировании стопок ядерных фотоэмульсий, было установлено, что доля антиядер с  $Z > 2$  в первичном космическом излучении не превышает 0,1% [117].

Позднее, в 1968 г., Иванова и др. [122] провели детальный анализ сечений взаимодействия антиядер с ядрами фотоэмульсии. Они также оценили влияние различий в сечениях взаимодействия ядер и антиядер на определение верхнего предела содержания антиядер в космических лучах. В их работе, основанной на данных эксперимента на спутнике "Космос-4", был получен верхний предел  $n_{\bar{A}} < 0,59\%$  для многозарядной компоненты первичных космических лучей с энергией до 1,4 ГэВ/нуклон. Этот результат согласуется с ранее опубликованными данными [115, 117] после учёта поправок на вторичное происхождение частиц и различия в сечениях взаимодействия [122].

В 1962 г. группой М.В. Аппарао проведён эксперимент по поиску аннигиляции антипротонов в стопках ядерной фотоэмульсии при остаточной атмосфере

4,2 г см<sup>-2</sup> [118]. После сканирования стопок ядерных фотоэмульсий отбирались взаимодействия, в которых рождалась хотя бы одна частица с толщиной трека, соответствующей энерговыделению не более 2 мр (минимально ионизирующим однозарядным частицам) [123]. Этот критерий гарантировал, что при взаимодействии рождается π-мезон, характерный для аннигиляции [124]. Затем все треки, направления которых лежат в пределах заданного телесного угла, должны быть прослежены от вершины взаимодействия к верху стопки эмульсии. Для таких траекторий устанавливают направление их прилёта путём восстановления трека по следам, вызванным ионизационными потерями. Если один из треков соответствует частице, которая вошла в стопку фотоэмульсии сверху, замедлилась и проаннигилировала, то можно измерить её полную энергию. Далее идентифицируются остальные треки и измеряется энергия соответствующих им частиц. Затем суммарная энергия всех частиц сравнивается с энергией частицы, пришедшей сверху. Если суммарная энергия, высвобожденная во взаимодействии, значительно превышает кинетическую энергию, связанную с входящим треком, то частица идентифицируется как антипротон.

В эксперименте, поставленном группой Аппарао в 1967 г., было изучено в общей сложности 5000 взаимодействий, и не было обнаружено ни одного события, связанного с аннигиляцией антипротона. Это позволило установить верхний предел на отношение потоков антипротонов к протонам  $3 \times 10^{-4}$  в энергетическом диапазоне от 50 до 150 МэВ [118, 125].

В работе [126] представлен новый для того времени метод поиска антиматерии в первичных космических лучах с использованием комбинации сцинтилляционных детекторов и газового черенковского счётчика. Эксперимент на высотных аэростатах, проведённый в экваториальной зоне (Кампала, 15° с.ш.), позволил установить верхний предел содержания антиядер с  $Z \geq 6$  на уровне  $N_{\bar{A}}/N_A < 7,5\%$  (95% CL) для жёсткостей 10–18 ГВ и энергий 5–9 ГэВ/нуклон. Как показано на рис. 4, этот результат расширяет энергетический диапазон предыдущих измерений [117, 120, 122], выполненных в области  $< 1$  ГэВ/нуклон. Авторы подчёркивают, что повышенная энергия частиц увеличивает вероятность их внегалактического происхождения, что делает проверку симметрии материи и антиматерии во Вселенной более релевантной.

В конце 1970-х гг. в космических лучах впервые были зарегистрированы антипротоны с энергиями порядка нескольких ГэВ. В СССР эксперименты по поиску антипротонов в КЛ проводились в Ленинградском физико-техническом институте (ЛФТИ) под руководством В.А. Романова в 1972, 1974 и 1977 гг. [11]. Полёты выполнялись на высотах с остаточной атмосферой  $\sim 10$  г см<sup>-2</sup> и жёсткостью геомагнитного обрезания  $\sim 3,5$  ГВ [127].

Детектор, схема которого показана на рис. 5, состоял из сцинтилляционных детекторов (SD1–SD5), собранных в телескоп, системы искровых камер (SC1–SC4), необходимых для восстановления траекторий частиц, искривлённых полем постоянного магнита (М). Для исключения фона (электронов и π-мезонов) применялись газовый пороговый черенковский детектор (GCC), а для подавления частиц альбеда применялся направленный твердотельный черенковский детектор. В результате этих экспериментов впервые были зарегистрированы антипротоны, о чём сообщалось на 16-й Международ-

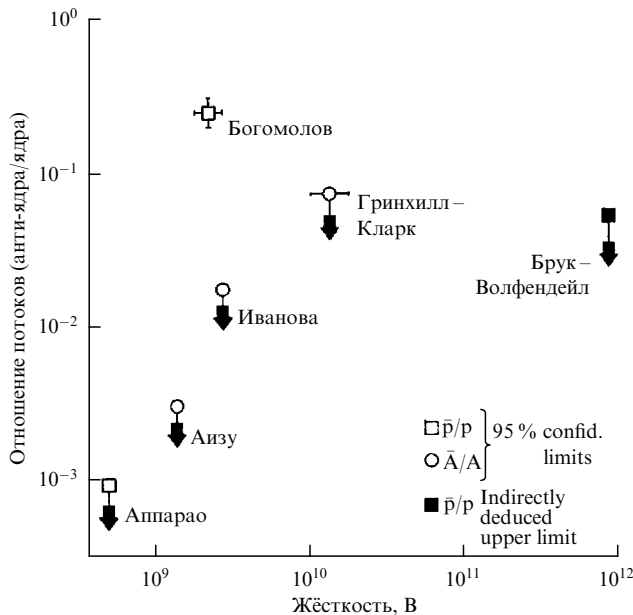


Рис. 4. Верхние пределы на потоки античастиц в первичном космическом излучении по данным экспериментов, проведённых с 1960 по 1970 гг. [126].

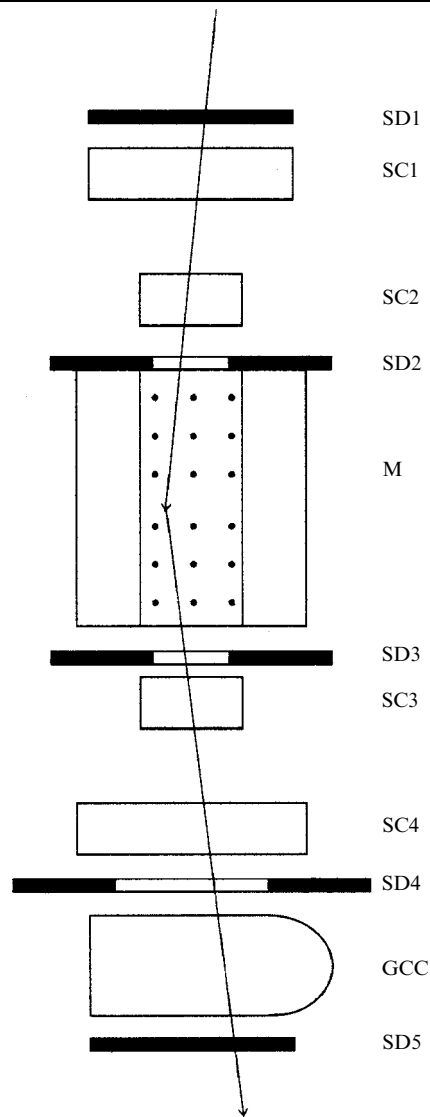


Рис. 5. Схема баллонного магнитного спектрометра в эксперименте группы Романова. SD1–SD5 — сцинтилляционные детекторы, GCC — газовый черенковский счётчик, SC1–SC4 — искровые камеры, М — магнит [128].

ной конференции по космическим лучам (ICRC) в Киото в 1979 г. [129]. Измеренное отношение потоков антипротонов и протонов в области энергий 2–5 ГэВ составило  $(6 \pm 4) \times 10^{-4}$ .

В 1983–1985 гг. та же группа повторила эксперимент для потока антипротонов низких энергий. Измеренное отношение потоков антипротонов и протонов в энергетической области 0,2–2 ГэВ было оценено на уровне  $0,6_{-0,5}^{+1,4} \times 10^{-4}$  [128, 130, 131].

В те же годы успешные эксперименты по поиску антипротонов были проведены под руководством Р.Л. Голдена в США [12, 132]. Первый полёт в этой серии баллонных экспериментов состоялся в 1979 г. в Техасе [12]. Измерения проводились под средней остаточной атмосферой  $5,4 \text{ г см}^{-2}$ . Жёсткость геомагнитного обрезания во время полёта изменялась от 4,55 ГВ до 5,5 ГВ, а время накопления данных составило 7,89 часа. Для регистрации антипротонов был использован магнитный спектрометр, схема которого показана на рис. 6. Детектор состоял из газовой черенковской детектора (G), двух сцинтилляторов (S1 и S2), восьми многопроволочных пропорциональных счётчиков (M1–M8) и семи сцинтилляторов (P1–P7).

Общее количество событий, идентифицированных как антипротоны, составило около 28, а отношение потоков  $\bar{p}/p$ , измеренное в этом эксперименте в 1979 г. в диапазоне жёсткостей с 5,6 по 12,5 ГВ, составило  $(5,2 \pm 1,5) \times 10^{-4}$ . Однако повторный анализ данных в 1982 г. показал увеличение этого отношения до  $(6,8 \pm 1,7) \times 10^{-4}$ , что объясняется существенным пересмотром оценки фоновых событий.

Основными источниками фона являлись антипротоны, рождённые в результате взаимодействия протонов космических лучей с атмосферой Земли, первоначальная оценка [133] которых была завышена примерно в три раза. По результатам последующих расчётов [134, 135] вклад атмосферных антипротонов снизился с 6,5 до 1,9 события. Аналогичным образом был пересмотрен вклад других фоновых компонентов. Фон антипротонов, рождённых в результате взаимодействий с детекторами (вторичных взаимодействий), первоначально оценивавшийся в 3,4 события, оказался пренебрежимо малым благодаря жёстким критериям отбора, включающим требования к углу вылета частиц и согласованности треков. Полностью исключён фон от альбедных антипротонов, который в ранней оценке составлял 2,5 события. При этом в новой обработке учтён ранее не рассматривавшийся эффект когерентного ядерного рассеяния в детекторе [17], дающий вклад 2,0–3,0 события, что было подтверждено методом Монте-Карло моделирования. Вклад от распада атмосферных мезонов (5,0–7,7 события, преимущественно  $\pi$  и K) и ложной идентификации высокоэнергетических протонов как антипротонов (0,2–1,2 события) остался практически неизменным. В результате суммарный фон уменьшился с 17,6 событий в первоначальной оценке до 10,7 в первоначальной выборке и 14,5 события для расширенного энергетического диапазона, что значительно повысило достоверность измерения отношения  $\bar{p}/p$  и объясняет его возросшее значение в окончательных результатах.

В 1980-х гг. в США регистрацией антипротонов в энергетическом диапазоне 130–320 МэВ также занималась научная группа А. Баффингтона [17]. Однако методика, которую они использовали, отличалась от дру-

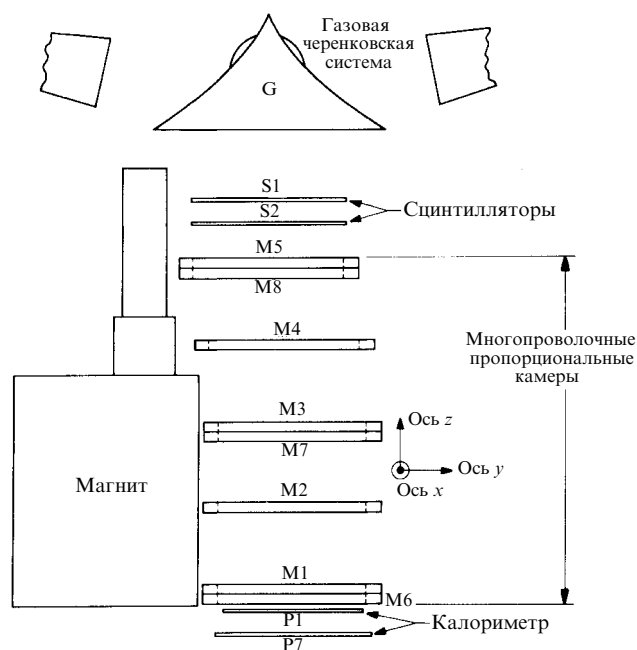


Рис. 6. Схема сверхпроводящего магнитного спектрометра в эксперименте Голдена. Обозначены: G — черенковский детектор, S1/S2 — сцинтилляторы, M1–M8 — пропорциональные камеры, P1–P7 — сцинтилляционные счётчики калориметра [132].

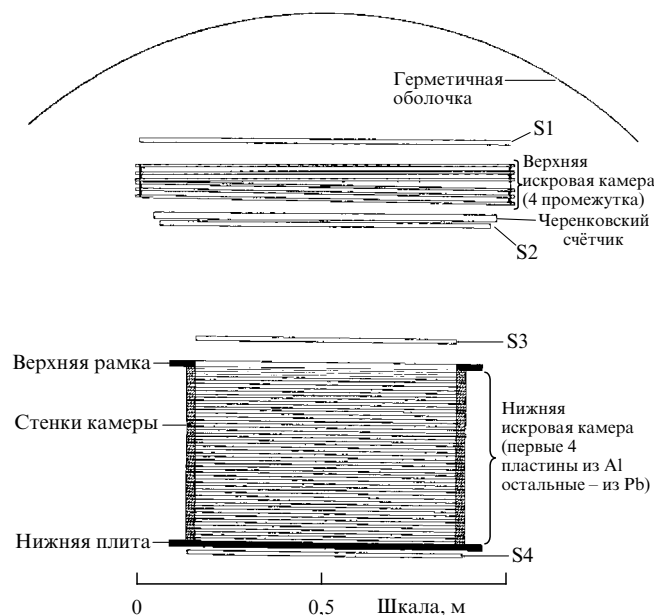


Рис. 7. Схема детектора, используемого в эксперименте Баффингтона [17].

гих экспериментов тем, что антипротоны идентифицировались не по кривизне траектории в магнитном поле, а по характерной топологии аннигиляции в свинцовых пластинах искровой камеры [17]. Детектор, схема которого представлена на рис. 7, состоял из системы сцинтилляторов (S1–S4), пластикового черенковского счётчика, верхней и нижней искровых камер. Сцинтилляционные детекторы (S1–S3) имели энергетический порог, позволяющий отсеять низкоэнергетические частицы, а детектор S4 регистрировал продукты аннигиляции, прошедшие через

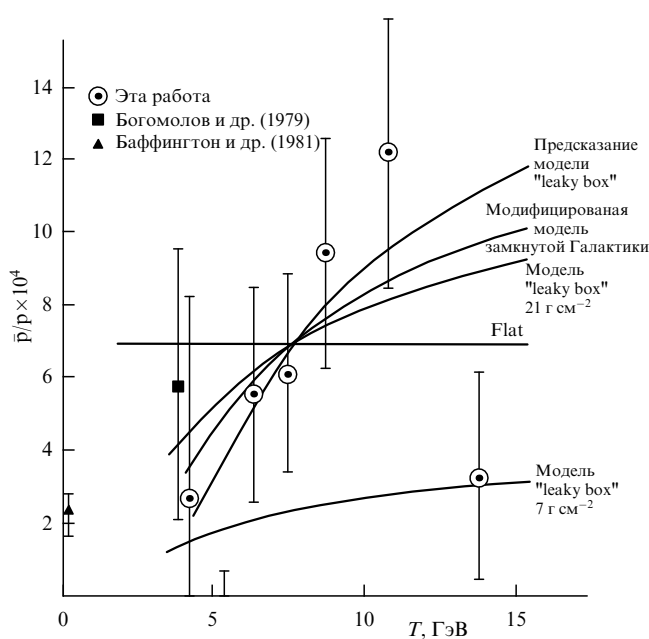


Рис. 8. Отношение антипротонов к протонам, измеренное Р.Л. Голденом в 1984 г., в сравнении с данными других экспериментов. Пунктирные кривые показывают предсказания различных моделей [132].

все свинцовые пластины искровой камеры. Черенковский счётчик, работавший в режиме антисовпадений, использовался для подавления фона от релятивистских частиц. Верхняя искровая камера использовалась для регистрации треков первичных частиц, а антипротоны идентифицировались по характеристикам их аннигиляции в свинцовой нижней искровой камере. Основные измерения проводились в полёте аэростата над Канадой на высоте 28,5 км при остаточной атмосфере примерно  $9 \text{ г см}^{-2}$ , что позволило обеспечить низкий энергетический порог для регистрации антипротонов и минимизировать атмосферный фон. Измеренное отношение антипротонов и протонов составило  $(2,2 \pm 0,6) \times 10^{-4}$  [17].

На рисунке 8 представлены данные, полученные в 1984 г. Р.Л. Голденом, в сравнении с результатами экспериментов группы В.А. Романова (1979 г.) и А. Баффингтона (1981 г.) [11, 17, 132]. Для удобства результаты этих измерений сведены в табл. 1. В работе [132] проведён детальный анализ энергетической зависимости отношения  $\bar{p}/p$  в диапазоне 4,4–13,4 ГэВ и показано, что наблюдаемое соотношение существенно (на уровне  $< 10^{-4}$ ) превышает предсказания стандартной модели "leaky-box" для толщины проходимого вещества  $7 \text{ г см}^{-2}$ .

Последующие измерения, выполненные в ЛФТИ [128, 130], позволили сделать вывод о наличии кинематического обрезания спектра антипротонов при энергиях

Таблица 1. Сравнение измерений отношения  $\bar{p}/p$

Измерение	Год	Энергетический диапазон, ГэВ	Отношение $\bar{p}/p$
Богомолов и др.	1979	2–5	$(6 \pm 4) \times 10^{-4}$
Голден и др.	1979	4,7–11,6	$(5,2 \pm 1,5) \times 10^{-4}$
Баффингтон и др.	1981	0,13–0,32	$(2,2 \pm 0,6) \times 10^{-4}$
Богомолов и др.	1987	0,2–2	$(0,6^{+1,4}_{-0,5}) \times 10^{-4}$

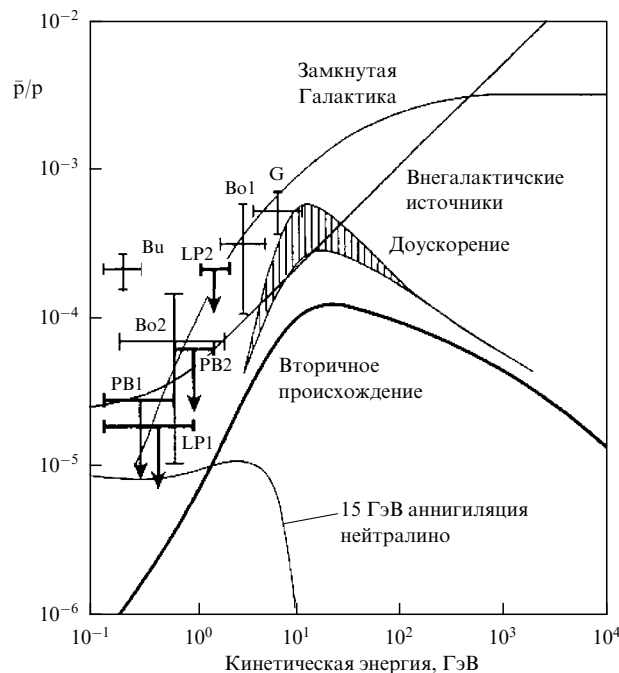


Рис. 9. Верхние пределы отношения потоков антипротонов и протонов и сравнение с теоретическими моделями и другими экспериментами [18–20]. Результаты PBAR обозначены как PB1, PB2; результаты LEAP как LP1 и LP2.

ниже 1 ГэВ, характерного для их вторичного происхождения в космических лучах. Эти результаты противоречили ранним данным группы Баффингтона, что впоследствии было также подтверждено в более точных баллонных экспериментах PBAR [18] и LEAP [19, 20]. Стоит отметить, что данные Голдена и др. [132] и результаты ЛФТИ (Богомолов и др. [128, 130]) статистически совместимы (в пределах ошибок) в перекрывающемся диапазоне 2–5 ГэВ и также дополняют друг друга в непрерывающихся диапазонах энергий, что позволило объяснить происхождение космических антипротонов. Таким образом, Голден в средних энергиях (4–13 ГэВ) и группа Романова в низких (0,2–2 ГэВ) совместно опровергли результаты Баффингтона и поддержали гипотезу вторичной генерации с модификациями модели распространения (в частности, с увеличенной средней толщиной вещества до  $21 \text{ г см}^{-2}$ ).

Развитие этих исследований стимулировало интерес не только к проблеме барионной асимметрии Вселенной, но и к фундаментальным механизмам генерации космических лучей, включая возможный вклад от аннигиляции частиц тёмной материи. На рисунке 9 показано сравнение различных теоретических предсказаний с экспериментальными данными, включая результаты Голдена. В частности, модель "leaky-box" с увеличенной толщиной вещества ( $\sim 21 \text{ г см}^{-2}$ ) и модифицированная модель замкнутой Галактики [136] лучше описывают наблюдаемый избыток антипротонов.

Эксперименты Романова, Голдена и Баффингтона позволили не только впервые достоверно обнаружить антипротоны в космических лучах, но и заложили основу для последующих высокоточных измерений. Эти работы сыграли ключевую роль в развитии современных представлений о механизмах генерации и распространения космических лучей в Галактике.

### 3. Наблюдения антипротонов с энергиями от десятков МэВ до сотен ГэВ в космических лучах

Магнитный спектрометр PBAR проводил измерения в широком диапазоне энергий от 100 до 1580 МэВ включительно в Канаде в 1987 г. Полёт аэростата проводился на высоте 36 км в течение 10,5 часов, а плотность остаточной атмосферы составила  $4,8 \text{ г см}^{-2}$ . По данным эксперимента PBAR получены верхние пределы отношения потоков антипротонов и протонов в двух энергетических диапазонах: от 100 до 640 МэВ —  $2,8 \times 10^{-5}$  и от 640 до 1580 МэВ —  $6,1 \times 10^{-5}$  [18].

Эксперимент LEAP (Low Energy AntiProton) был направлен на изучение потока космических антипротонов в энергетическом диапазоне 600–1200 МэВ. Основными детекторами LEAP являлись магнитный спектрометр, времяпролётная система и черенковские счётчики. По данным эксперимента LEAP получен верхний предел отношения потоков антипротонов и протонов  $2,3 \times 10^{-4}$  [20].

Результатами экспериментов PBAR и LEAP являются верхние пределы отношения потоков антипротонов и протонов, которые представлены на рис. 9 и сведены в табл. 2. Было отмечено, что полученный предел согласуется с моделями вторичного производства антипротонов (модель "leaky-box"). На тот момент это был самый строгий верхний предел на соотношение  $\bar{p}/p$ .

Ожидалось, что антипротоны рождаются как вторичные продукты взаимодействия первичных ядер космических лучей (главным образом протонов) с межзвёздной средой. Однако первые измерения антипротонов космических лучей [17, 128, 132] показали более высокие потоки, чем предсказывали современные модели вторичного рождения. В области высоких энергий эта особенность поведения потока антипротонов проявляется заметнее, что будет показано дальше.

Несколько следующих экспериментов были построены на основе LEAP и заключались в модернизации отдельных детекторных систем [137–140].

В 1991 г. на базе LEAP был проведён баллонный эксперимент MASS91 (рис. 10), который включал в себя следующие детекторы: мощный магнитный спектрометр, времяпролётную систему, черенковский счётчик и трёхмерный калориметр — все компоненты работали совместно для точной идентификации антипротонов [137, 138].

Магнитный спектрометр состоял из сверхпроводящего магнита с напряжённостью поля 2,2 Тл и гибридной трековой системы, включающей два модуля дрейфовых камер и восемь плоскостей многопроволочных пропорциональных камер. Времяпролётная система (ВПС) — две плоскости пластиковых сцинтилляторов, формирующие триггер сбора данных при совпадении сигналов. Эти сигналы позволяли измерять направление, скорость частицы и анализировать амплитуду импульса для оценки ионизационных потерь. Времяпролётная система обладала временным разрешением 370 пс, что позволяло надёжно отделять альбедо-частицы. Черенковский детектор, установленный под верхней плоскостью ВПС, разделял лёгкие частицы (мюоны, электроны, позитроны) от более тяжёлых протонов и антипротонов. Координатно-чувствительный калориметр располагался под нижним сцинтиллятором и состоял из 40 слоёв латунных стримерных трубок (7,33 радиационных длин). Трубки в че-

Таблица 2. Верхний предел для отношения  $\bar{p}/p$

Измерение	Энергетический диапазон, ГэВ	Верхний предел для $\bar{p}/p$
PBAR	0,10–0,64	$2,8 \times 10^{-5}$
PBAR	0,64–1,58	$6,1 \times 10^{-5}$
LEAP	0,60–1,20	$2,3 \times 10^{-4}$

Таблица 3. Измеренные потоки антипротонов в эксперименте MASS91

Энергетический диапазон, ГэВ	Поток антипротонов, $\times 10^{-3} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1} \text{ ГэВ}^{-1}$
3,7–6,3	$8,2^{+10,3}_{-6,6}$
6,3–11,6	$4,2^{+4,2}_{-2,7}$
11,6–24,1	$2,1^{+1,7}_{-1,1}$

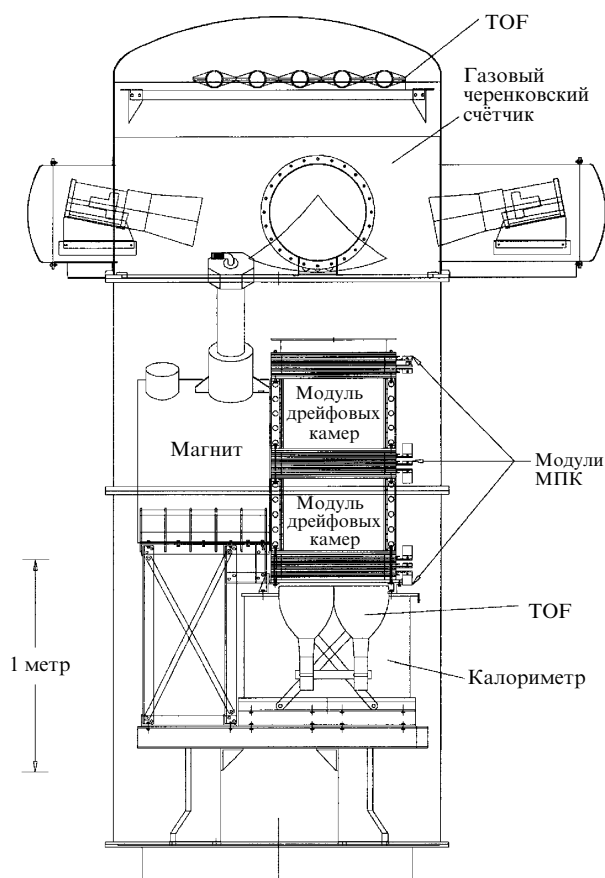


Рис. 10. Схема спектрометра MASS91 [137, 138].

редующихся слоях располагались перпендикулярно друг другу, чтобы получить трёхмерное изображение частицы, проходящей через калориметр. Таким образом обеспечивалась сепарация электромагнитных и адронных ливней. Комбинация сигналов от калориметра и черенковского детектора помогала отделить антипротоны от фоновых электронов.

В эксперименте MASS91 [137] в энергетическом диапазоне 3,7–19 ГэВ было зарегистрировано 11 антипротонов и 69311 протонов, что соответствует отношению  $\bar{p}/p = 1,24^{+0,08}_{-0,51} \times 10^{-4}$ . В более позднем анализе данных MASS91 [138] в расширенном диапазоне 3,7–24,1 ГэВ было обнаружено 15 антипротонов, а также измерены их потоки, которые представлены в табл. 3.

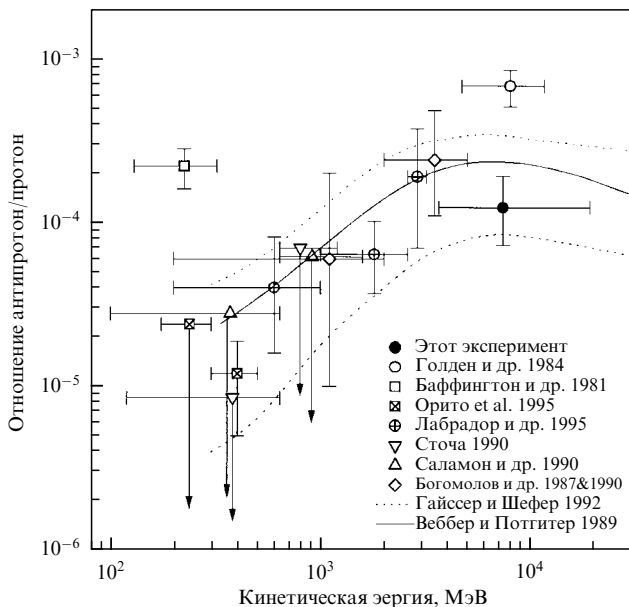


Рис. 11. Отношение антипротонов и протонов, измеренное в эксперименте MASS91 [137], в сравнении с другими экспериментальными данными и расчётами Гайссера и Шефера (1992 г.) (пунктирные линии) [141] и Уэббера и Поттгитера (1989 г.) (сплошная линия) [142].

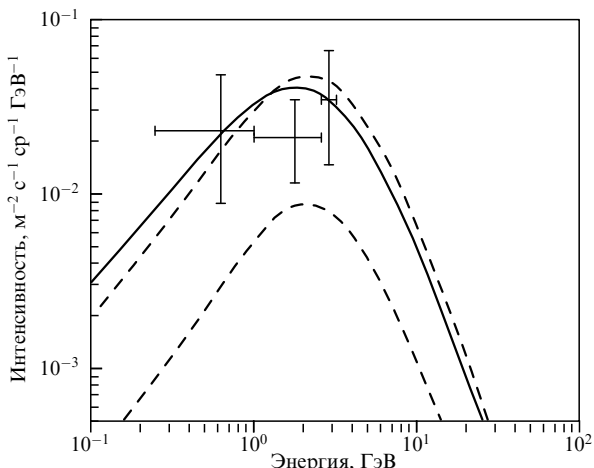


Рис. 12. Поток антипротонов, измеренный IMAX, с межзвёздным спектром антипротонов Уэббера и Поттгитера (сплошная кривая) [142] и пределами спектра Гайссера и Шефера (пунктирные кривые) [141].

Результаты экспериментов MASS91 [137, 138] подтверждают, что наблюдаемый поток антипротонов соответствует их вторичному происхождению в результате взаимодействия космических лучей с межзвёздной средой. Это согласуется с расчётами Гайссера и Шефера (1992 г.) [141], а также Уэббера и Поттгитера (1989 г.) [142], основанными на стандартной модели распространения ("leaky box") (рис. 11).

Результаты похожего баллонного эксперимента IMAX были представлены в 1996 г. для диапазона энергий 0,25–3,2 ГэВ [139]. Для отождествления частиц по заряду и массе использовались измерения магнитной жёсткости, ионизационных потерь энергии в детекторах и скорости. Согласно полученным результатам, поток антипротонов согласуется со вторичной природой антипротонов и не требует экзотических источников (рис. 12).

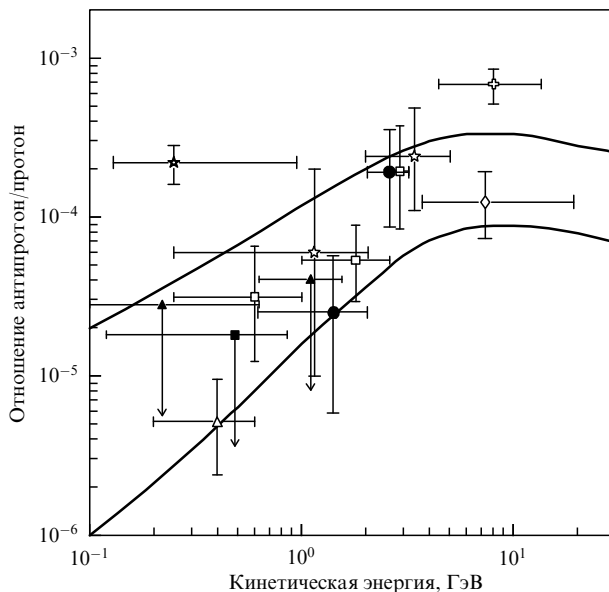


Рис. 13. Спектр отношения  $\bar{p}/p$  в верхних слоях атмосферы по данным баллонных экспериментов: открытые кресты — результаты Голдена и др. [132], заполненные звёзды — измерения А. Баффингтона [17], открытые звёзды — по измерениям группы Романова [130, 131], открытые квадраты — данные эксперимента IMAX [139], открытые звёзды — данные эксперимента MASS91 [137], открытые треугольники — данные эксперимента BESS [29], закрашенные кружки — CAPRICE [140]; сплошные линии — максимум и минимум отношения  $\bar{p}/p$ , рассчитанные Гайссером и Шефером [141].

В период минимума солнечной активности (август 1994 г.) был проведён баллонный эксперимент CAPRICE для измерения потока космических антипротонов в энергетическом диапазоне от 0,62 до 3,19 ГэВ [140]. Полёт проводился на высоте приблизительно 37 км, где влияние атмосферы минимально. Аппарат состоял из кольцевого черенковского детектора (RICH), времяпролётной системы (ToF), магнитного спектрометра с дрейфовыми и многопроволочными камерами, а также кремниево-вольфрамового электромагнитного калориметра. Впервые в практике баллонных экспериментов по изучению космических лучей была применена комбинация кольцевого черенковского детектора и калориметра, что позволило повысить эффективность идентификации антипротонов на фоне лёгких отрицательных частиц — электронов, мюонов и пионов.

По результатам измерений было установлено, что отношение потоков антипротонов и протонов возрастает в диапазоне кинетических энергий от 0,6 до 3,2 ГэВ. Это подтверждает гипотезу вторичного происхождения антипротонов — их генерация происходит в результате взаимодействий первичных космических частиц с межзвёздной средой. Однако совокупный спектр, построенный по результатам различных измерений [132, 137, 139], допускает возможность более быстрого роста отношения  $\bar{p}/p$  с энергией, чем предсказывают классические модели вторичного происхождения [141] (рис. 13).

Продолжением эксперимента CAPRICE стал эксперимент CAPRICE-98 [143], расширивший измерения антипротонов до более высоких энергий и показавший, что отношение  $\bar{p}/p$  незначительно растёт в диапазоне до  $\sim 50$  ГэВ, но без значительного отклонения от модели вторичного происхождения при текущей статистике.

Этот рост оставлял открытой возможность небольшого вклада от первичных источников, однако полученные данные можно описать и без этого вклада. Параллельно, в те же годы (середина – конец 1990-х гг.), баллонный эксперимент HEAT-bar [144] впервые зарегистрировал аномальный избыток позитронов — точку, существенно превышающую прогноз вторичного происхождения. Это было воспринято как возможный сигнал экзотических процессов, поскольку позитроны и антипротоны потенциально могут образовываться в результате аннигиляции тёмной материи. Результаты экспериментов CAPRICE-98 и HEAT-bar вызвали повышенный интерес к этой гипотезе. Хотя впоследствии эта особенность не подтвердилась в потоке антипротонов, интерес к ним не угас, что способствовало разработке новых экспериментов (таких как BESS, AMS, PAMELA), о которых написано далее в разделе 3.1.

Параллельно с экспериментальными достижениями, в 1998 г. была опубликована работа М. Симона и др. [145], в которой представлены усовершенствованные теоретические расчёты потока вторичных антипротонов в межзвёздной среде. Они основывались на стандартной "leaky-box" модели распространения космических лучей, но с рядом важных улучшений:

- использованы новые спектры протонов и гелия, измеренные прибором IMAX [139, 146];
- для моделирования ядерных взаимодействий применялась Монте-Карло модель DTUNUC [147];
- учтены энергетические изменения антипротонов при их распространении: неаннигилирующие взаимодействия и упругие рассеяния [145].

На рисунке 14 показано сравнение спектра антипротонов, рассчитанного в работе [145], с предыдущими теоретическими моделями [123, 141, 142]. Полоса, ограниченная двумя сплошными линиями, отражает диапазон неопределённости, связанный с различиями в моделях распространения космических лучей в Галактике. Эти модели описывают, какое среднее количество вещества частицы проходят, прежде чем покинуть область, где возможны их взаимодействия с межзвёздным газом. Чем больше такое расстояние, тем больше вероятность, что первичный космический протон породит вторичный антипротон. Верхняя граница области соответствует расчётам, в которых учтены два ключевых процесса, изменяющих энергию антипротонов при их распространении: это упругое рассеяние и неаннигилирующие столкновения с ядрами межзвёздной среды. В этих взаимодействиях антипротон сохраняется, но его энергия изменяется — в основном снижается, что особенно существенно на низких энергиях. Учёт этих процессов приводит к увеличению потока антипротонов на малых энергиях. Нижняя граница соответствует модели, в которой такие процессы игнорируются, и поток формируется только за счёт первичных взаимодействий протонов без последующей переработки спектра. Сравнение с теоретическими моделями, построенными ранее Гайссером и Шефером (1992 г.) [141], Уэббером и Потгитером (1989 г.) [142], а также Стивенсом и Голденом (1987 г.) [123], показывает, что расчёты Симона (1998 г.) [145] дают менее завышенные значения потока при низких энергиях, однако при энергиях выше 1 ГэВ предсказания новых и старых моделей сходятся, подтверждая устойчивость теоретического подхода в этой области.

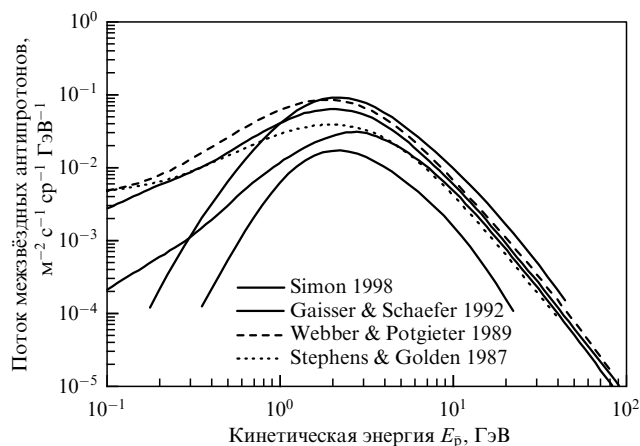


Рис. 14. Сравнение спектра  $\bar{p}$ , полученного по результатам расчётов М. Симона и др. [145], с предыдущими теоретическими результатами [123, 141, 142].

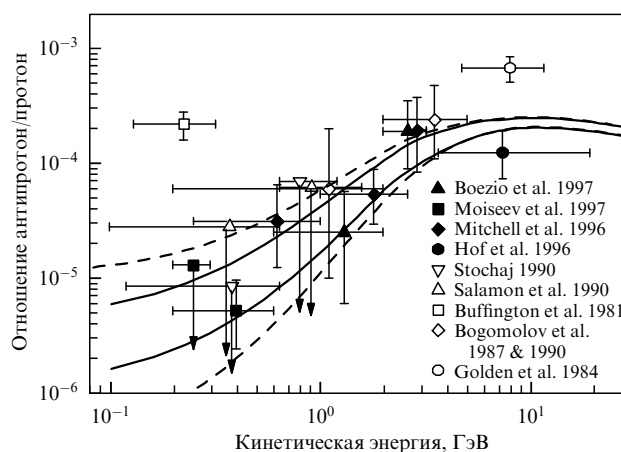


Рис. 15. Сравнение теоретического расчёта отношения  $\bar{p}/p$  [145] с опубликованными на тот момент экспериментальными данными (CAPRICE [140], BESS [29], IMAX [139] и других экспериментов [17, 131, 132, 137, 158]). Область, ограниченная двумя сплошными линиями, охватывает все основные неопределённости, рассмотренные в данной работе, и получена при значении параметра солнечной модуляции  $\phi = 750$  МВ. Верхняя и нижняя пунктирные линии иллюстрируют чувствительность этого отношения к изменению параметра модуляции: при  $\phi = 500$  МВ вся область смещается вниз до нижней пунктирной линии, а при  $\phi = 1000$  МВ — вверх до верхней пунктирной линии.

На рисунке 15 приведено сравнение теоретического отношения антипротонов к протонам, полученного на верхней границе атмосферы после учёта солнечной модуляции, с экспериментальными данными, доступными на момент публикации работы [145]. Расчётные диапазоны охватывают ключевые источники неопределённости: вариации в параметрах распространения частиц в Галактике, различия в ядерных сечениях при генерации антипротонов, а также влияние солнечной активности. Сплошные линии отображают совокупный диапазон этих неопределённостей.

Пунктирные кривые иллюстрируют чувствительность отношения  $\bar{p}/p$  к изменению уровня солнечной модуляции: верхняя линия соответствует высоким значениям модуляционного потенциала ( $\phi = 1000$  МВ), нижняя — минимальным условиям ( $\phi = 500$  МВ). Видно, что

экспериментальные точки, полученные в экспериментах CAPRICE [140], BESS [29], IMAX [139] и других, в целом укладываются в расчётный диапазон, особенно при учёте соответствующего значения  $\phi$  для каждого периода наблюдений.

Таким образом, на момент публикации работы [145] не было необходимости привлекать нестандартные физические источники (например, аннигиляцию частиц тёмной материи) для объяснения наблюдаемого потока антипротонов. Тем не менее подчёркивается необходимость повышения точности и расширения энергетического диапазона будущих измерений, особенно в диапазоне выше 10 ГэВ, где различия между моделями становятся более выраженными.

В следующем разделе будут рассмотрены современные и перспективные эксперименты, которые предназначены для измерения антипротонов в составе галактической компоненты космических лучей и альбедо Земли.

### 3.1. Антипротоны в галактических космических лучах

В большинстве современных экспериментов по поиску антипротонов используются многокомпонентные детекторные системы, которые, как правило, включают в себя сверхпроводящий магнитный спектрометр для определения знака заряда и магнитной жёсткости частицы.

**3.1.1. BESS.** Первые прецизионные измерения спектров антипротонов выполнены в серии экспериментов BESS — Balloon experiment with Super Solenoid. Программа экспериментов BESS [29, 149–153] проводилась с целью изучения происхождения и распространения галактических и атмосферных космических лучей. В рамках этой программы с 1993 по 2008 гг. было проведено 11 полётов высотных аэростатов. Девять из них выполнены в северных широтах над Канадой (BESS 93–2002, BESS–TeV), а два других над Антарктидой (BESS-Polar и BESS-Polar II). В каждом полёте конфигурация детекторов изменялась и совершенствовалась, что позволяло увеличивать статистику зарегистрированных антипротонов и расширять энергетический диапазон.

Прибор BESS представляет собой магнитный спектрометр с большим геометрическим фактором, использующий тонкий сверхпроводящий соленоидальный магнит [154] и трековую систему с дрейфовой камерой вы-

сокого разрешения [151]. Спектрометр оснащён времяпролётной системой (ToF) и черенковским счётчиком на основе силикагеля и аэрогеля (ACC).

В конфигурациях BESS до 2004 г. все детекторы и магнит находятся в цилиндрической оболочке под давлением в 1 атмосферу, как показано на рис. 16. Горизонтальная конфигурация позволяет спектрометру быть компактным и иметь широкую апертуру с геометрическим фактором  $0,3 \text{ м}^2 \text{ ср}$ .

Попадая в прибор, частица пролетает через постоянное поле напряжённостью 1 Тл, создаваемое тонким сверхпроводящим соленоидом [154, 155]. Траектория частицы регистрируется стриповой дрейфовой камерой (JET), обеспечивающей пространственное разрешение 200 мкм в плоскости искривления траектории, а также дополнительными внутренней (IDC) и внешней (ODC) дрейфовыми камерами с аналогичным разрешением в плоскости искривления траектории и улучшенным до 350 мкм разрешением вдоль продольной оси  $z$ . Эти камеры используются для предварительной реконструкции треков. Максимальная измеряемая жёсткость (MDR, от англ. maximum detectable rigidity) до 2000 г. составляла 200 ГВ.

Первые результаты эксперимента BESS, проведённого в 1993 г., опубликованы в 1995 г. [28]. В статье сообщалось об обнаружении четырёх антипротонов в энергетическом диапазоне от 300 до 500 МэВ, которые были впервые идентифицированы посредством измерений импульса и скорости, что позволило однозначно определить массы частиц. В более низком энергетическом диапазоне от 175 до 300 МэВ антипротоны не наблюдались, но был получен верхний предел отношения потоков антипротонов и протонов, равный  $2,9 \times 10^{-5}$ , а для полного энергетического диапазона этот предел составил  $8,9_{-4,7}^{+7,9} \times 10^{-6}$ . Позднее, в 1997 г., было зарегистрировано 7 антипротонов, и на этой статистике восстановлен поток антипротонов, который составил  $6,4_{-3,5}^{+5,5} \times 10^{-3} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1} \text{ ГэВ}^{-1}$ , а также отношение антипротонов и протонов в энергетическом диапазоне от 200 до 600 МэВ:  $5,2_{-2,8}^{+4,4} \times 10^{-6}$  [29].

Для того чтобы описать всю полноту серии экспериментов BESS, необходимо упомянуть также BESS-TeV, представлявший собой улучшенную версию спектрометра BESS, реализованную в 2002–2003 гг. Целью модер-

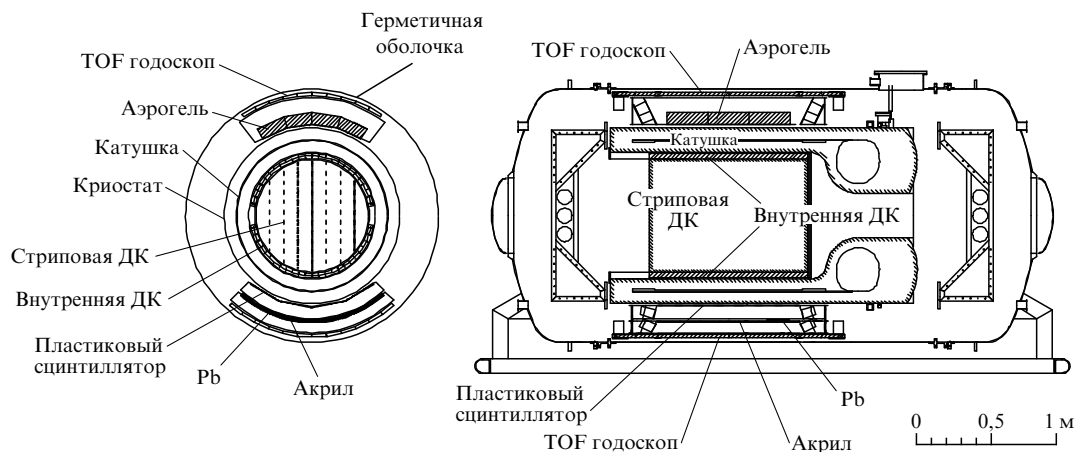


Рис. 16. Схема BESS в поперечном разрезе: стриповая дрейфовая камера (JET), времяпролётная система (ToF), аэрогелевый черенковский счётчик (ACC), внутренняя дрейфовая камера (IDC), внешняя дрейфовая камера (ODC) [151].

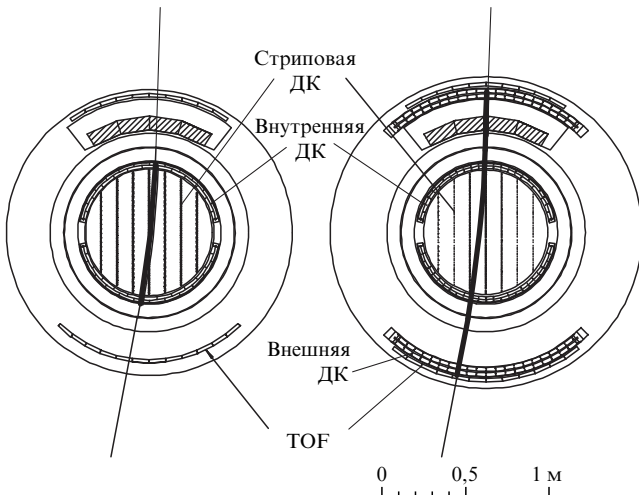


Рис. 17. Схема эксперимента BESS-TeV в сравнении с BESS-98 [156].

низации было расширение диапазона измеряемых жёсткостей и повышение разрешения трековой системы для прецизионного измерения спектров протонов, ядер гелия и атмосферных мюонов до сотен ГэВ и выше. Одним из основных назначений BESS-TeV (рис. 17) было измерение потоков первичных космических лучей в области высоких энергий вплоть до 1 ТэВ [152]. Для этого стриповая дрейфовая камера (JET) и внутренние дрейфовые камеры (IDC) были усовершенствованы, что увеличило число точек трека и улучшило пространственное разрешение. Дополнительно были установлены новые внешние дрейфовые камеры (ODC), удвоившие длину измеряемого трека и обеспечившие более высокую точность по жёсткости. В результате максимальная измеряемая жёсткость возросла до 1,4 ТэВ [156], что позволило впервые получить точные данные по спектрам протонов (1–540 ГэВ), ядер гелия (1–250 ГэВ/нуклон) и атмосферных мюонов (0,6–400 ГэВ  $c^{-1}$ ). Хотя антипротоны в TeV-диапазоне в этом эксперименте не измерялись, BESS-TeV имеет особое значение для данного обзора, так как именно он расширил энергетический диапазон экспериментов BESS и положил начало программе поиска антигелия [157] (подробнее см. раздел 5).

Самым совершенным детектором в программе BESS был прибор BESS-Polar [151, 158–160], разработанный специально для длительных полётов над Антарктидой в условиях минимального геомагнитного обрезания для того, чтобы проводить измерения спектров низкоэнергетических частиц и античастиц галактических космиче-

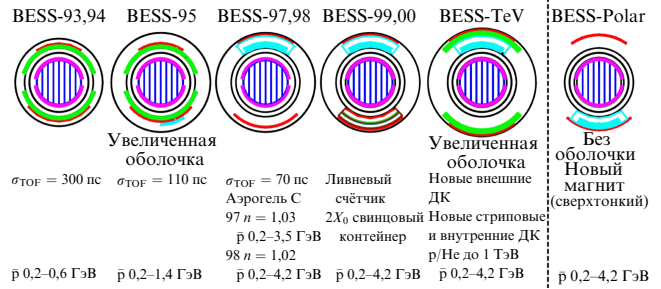


Рис. 19. История экспериментов BESS, включая BESS-Polar [165].

ских лучей. Основной целью проекта BESS-Polar являлось уточнение возможного наличия избытка антипротонов низкой энергии, на который указывали данные эксперимента BESS95+97 [149], а также проведение прецизионных измерений их энергетического спектра для проверки моделей вторичного происхождения антипротонов. Дополнительными задачами были поиск первичных антипротонов от экзотических источников, таких как испарение первичных чёрных дыр или аннигиляция тёмной материи, и установление новых пределов на содержание антигелия в космических лучах (подробнее см. раздел 5).

Взаимное расположение детекторных систем спектрометра представлено на рис. 18.

Однородное поле 0,8 Тл создаётся в тонком сверхпроводящем соленоиде, устройство которого описано в работах [162, 163], внутри которого расположена дрейфовая камера с трековыми детекторами. Траектория частиц восстанавливается по 52 точкам с разрешением порядка 140 мкм в изгибающей плоскости, что позволило измерить магнитную жёсткость с разрешением 0,4 % для протонов 1 ГВ, максимальная измеряемая жёсткость составила 240 ГВ [164]. Геометрический фактор достигал 0,3 м<sup>2</sup> ср, что в сочетании с длительным временем набора данных обеспечило рекордную статистику.

Модернизация, энергетический диапазон и количество зарегистрированных антипротонов в хронологической последовательности были представлены на Европейском симпозиуме по космическим лучам в 2010 г. и показаны на рис. 19.

Программа BESS-Polar включала два антарктических полёта BESS-Polar I и BESS-Polar II. Полёт BESS-Polar I (2004 г.) продолжался 8,5 суток и зарегистрировал 900 млн событий, включая ~1500 антипротонов в диапазоне энергий от 0,1 до 4,2 ГэВ [158]. Позднее был проведён эксперимент BESS-Polar II, полёт которого со-

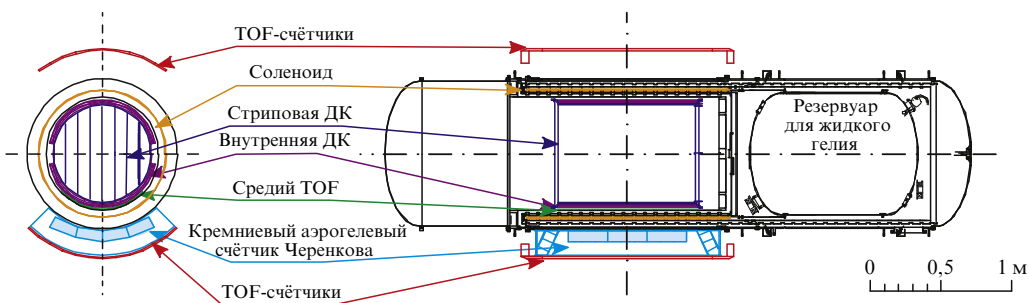


Рис. 18. Схема спектрометра BESS-Polar в поперечном разрезе [161].



Рис. 20. Траектории полёта над Антарктидой BESS-Polar I в 2004 г. (зелёный) и BESS-Polar II в 2007 – 2008 гг. (первый пролёт — синий, второй — красный) [165].

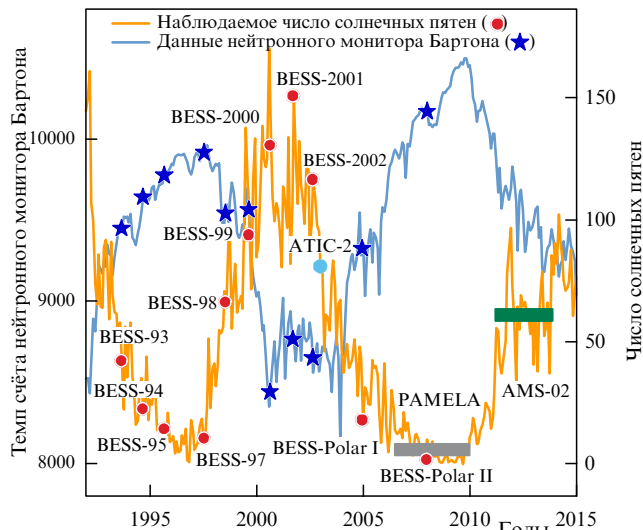


Рис. 22. Солнечная активность во время проведения экспериментов BESS. Красными кружками обозначены полёты BESS и BESS-Polar, соответствующие определённым годам. Синие звёздочки — измерения нейтронного потока, полученные с нейтронного монитора Бартола (Bartol Neutron Monitor) [160].

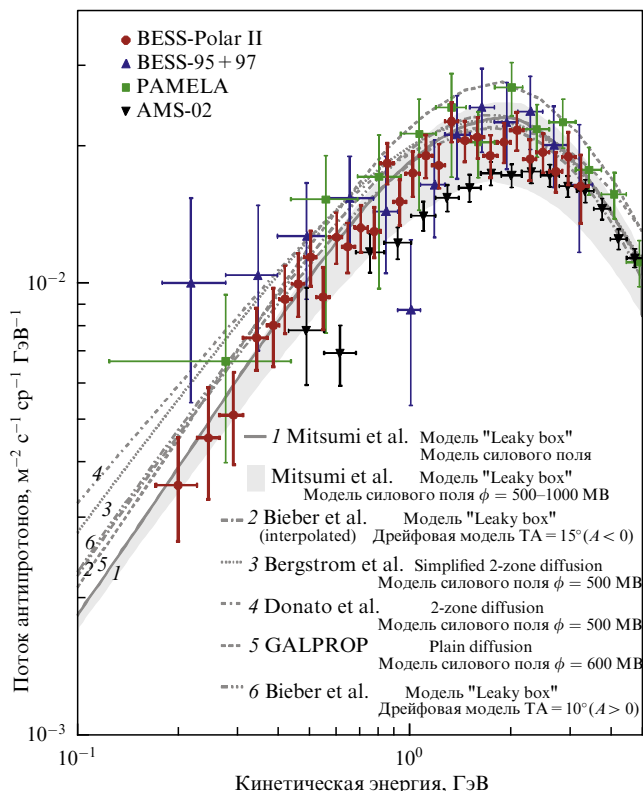


Рис. 21. Поток антипротонов в составе галактических космических лучей, измеренный в экспериментах BESS-Polar II, BESS95 + 97, PAMELA и AMS-02 [160].

стоялся с декабря 2007 по январь 2008 гг., собирая данные в течение рекордных 24,5 дня и зарегистрировав 4,7 млрд событий, из которых ~ 8000 антипротоны [164, 165]. Благодаря малому геомагнитному обрезанию вблизи южного полюса BESS-Polar смог провести хорошо статистически обеспеченные измерения потока антипротонов низкой энергии. Траектории полётов и жёсткости геомагнитного обрезания представлены на рис. 20.

На рисунке 21 показан спектр антипротонов, измеренный в эксперименте BESS-Polar II [164], в сравнении с

предыдущими экспериментами BESS95 + 97 [147], спутниковыми экспериментами PAMELA [166] и AMS-02 [15], а также с теоретическими расчётами в период минимума солнечной активности. Поток антипротонов BESS-Polar II хорошо согласуется с результатом PAMELA. Разница в потоках между BESS-Polar II и AMS-02 могла возникнуть из-за измерений в разные фазы солнечного цикла [160].

Важно отметить, что полёт BESS-Polar II [165] проводился практически во время минимума солнечной активности (рис. 22), когда условия наиболее благоприятны для регистрации низкоэнергетических частиц первичного космического излучения, в частности антипротонов, так как влияние солнечной активности минимально. Более того, в экспериментах BESS создана возможность в целом изучать эффект солнечной модуляции, так как их измерения охватывают практически полный цикл солнечной активности (см. рис. 22). Солнечная модуляция вызвана взаимодействием космических лучей с магнитным полем Солнца, переносимым солнечным ветром в межпланетное пространство. При этом существенное значение имеет полярность солнечного магнитного поля, меняющаяся примерно каждые 11 лет, и именно это позволяет на основе измерений отношения потоков антипротонов и протонов изучать зависимость солнечной модуляции от знака заряда [150, 167].

В экспериментах BESS, проведённых в 1999 и 2000 гг. в период максимума солнечной активности и смены полярности магнитного поля Солнца, была обнаружена зарядовая зависимость модуляции [150]. Отношение потоков антипротонов и протонов измерялось в 1999 г. (до инверсии поля) и в 2000 г. (после неё) в диапазоне энергий от 0,18 до 4,2 ГэВ. В результате измерений было показано, что это отношение оставалось стабильным до инверсии, но после смены полярности (2000 г.) наблюдалось резкое увеличение отношения потоков антипротонов и протонов, что согласуется с моделью дрейфа [167], в которой антипротоны и протоны двигаются по разным путям в гелиосферном магнитном поле [150].

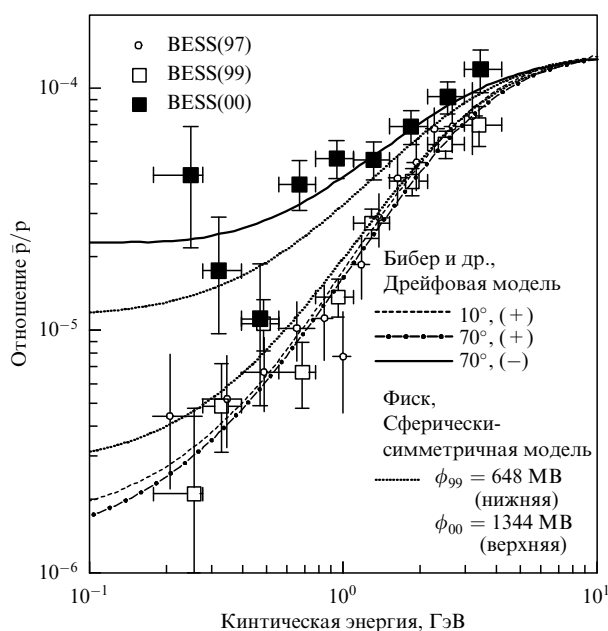


Рис. 23. Отношение потоков антипротонов и протонов в составе ГКЛ, измеренное спектрометром BESS в 1997, 1999 и 2000 гг. [150], в сравнении с теоретическими моделями [167, 169].

На рисунке 23 приведены измеренные значения отношения потоков  $\bar{p}/p$  и теоретические предсказания. Сферически-симметричная модель [168] объясняет увеличение отношения антипротонов к протонам вблизи максимума солнечной активности в основном за счёт снижения потока протонов. В то время как дрейфовая модель [167] предсказывает гораздо более выраженное увеличение этого отношения, обусловленное именно зависимостью от знака заряда. Как видно из данных BESS, показанных на рис. 23, наблюдаемые величины отношения потоков антипротонов и протонов  $\bar{p}/p$  гораздо лучше согласуются именно с дрейфовой моделью.

Эксперименты BESS-Polar I (2004 г.) и BESS-Polar II (2007–2008 гг.) [165] были проведены вблизи минимума солнечной активности и начала нового положительного цикла (см. рис. 22). В частности, в BESS-Polar I сравнение потоков протонов и антипротонов, зарегистрированных в рамках одного и того же полёта, позволило исключить вариации, связанные с внешними условиями, и надёжно интерпретировать полученные данные [162, 170].

На рисунке 24 приведены измерения отношения потоков  $\bar{p}/p$ , выполненные в BESS [171] и BESS-Polar I [170], а также расчёты по дрейфовой модели при различных значениях угла наклона гелиосферного токового слоя [30, 167].

Особую значимость имеют данные, полученные в переходный период смены полярности (1999–2000 гг.) и во время солнечного минимума (2007–2008 гг.), когда влияние модуляции на антипротоны становится минимальным. Результаты этих наблюдений подтверждают наличие зарядовой асимметрии и хорошо согласуются с моделями дрейфа, в частности с моделью, предложенной Бибером и др. [167], а также с расчётами при наклонном токовом слое с параметром  $\alpha$  [30]. Это согласие критически важно для корректного восстановления межзвёздного спектра антипротонов и, сле-

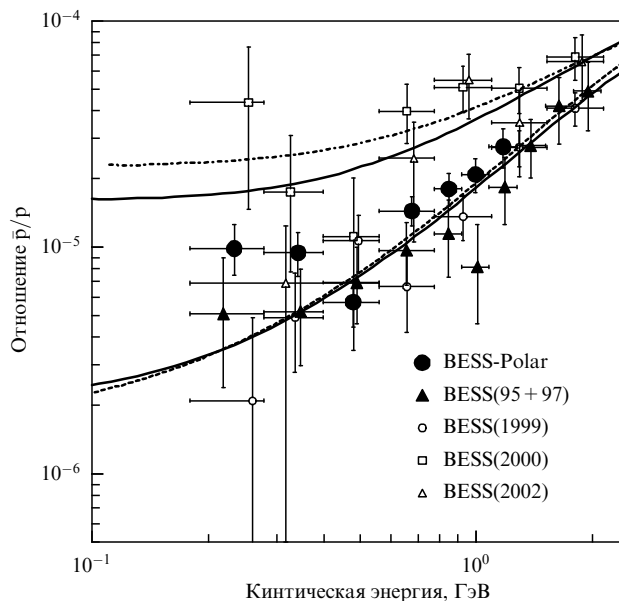


Рис. 24. Отношение потоков антипротонов и протонов ( $\bar{p}/p$ ), измеренное экспериментами BESS (1995 и 1997 гг.) и BESS-Polar I (2004 г.) [170], в сравнении с расчётами дрейфовой модели при различных углах наклона гелиосферного токового слоя. Кривые сверху вниз при 0,7 ГэВ соответствуют:  $A < 0$  и  $65^\circ$  (штрих-пунктирная),  $A < 0$  и  $25^\circ$  (сплошная),  $A > 0$  и  $65^\circ$  (пунктирная),  $A > 0$  и  $15^\circ$  (сплошная). Расчёты выполнены по модели Москаленко и др. [30].

довательно, для идентификации возможных первичных источников антивещества, таких как испаряющиеся первичные чёрные дыры или аннигиляция тёмной материи.

**3.1.2. HEAT-pbar.** Баллонный эксперимент HEAT-pbar [172] проводился в 2000 г. и дал одно из первых точных измерений потока антипротонов в диапазоне энергий от 4 до 50 ГэВ. Детектор представлял собой сверхпроводящий магнит с дрейфовым трубчатым годоскопом в центре, объединённый со множеством многопроволочных пропорциональных камер над и под годоскопом (рис. 25). Два слоя сцинтилляторов, один в самом верху, другой в самом низу прибора, обеспечивали измерение времени пролёта и вместе со сцинтиллятором, расположенным непосредственно над годоскопом, формировали триггер события.

В ходе полёта, проходившего на высоте, где остаточная атмосфера составляла  $7,2 \text{ г см}^{-2}$ , был зарегистрирован 71 антипротон, что позволило надёжно определить отношение потоков антипротонов и протонов ( $\bar{p}/p$ ). Эксперимент показал, что  $\bar{p}/p$  не увеличивается с ростом энергии и остаётся на уровне, соответствующем моделям вторичного происхождения антипротонов [30, 145, 172]. В последних энергетических бинах наблюдаемые значения отношения оказались меньше по сравнению с измеренными в эксперименте CAPRICE [143], сняв необходимость в привлечении механизмов первичного происхождения, обсуждавшихся ранее.

На рисунке 26 приведены экспериментальные результаты измерений отношения потоков антипротонов и протонов космических лучей. График включает результаты экспериментов HEAT-pbar [172], BESS [149], CAPRICE [143], MASS91 [137], IMAX [139], а также теоретические предсказания для разных сценариев происхождения антипротонов.

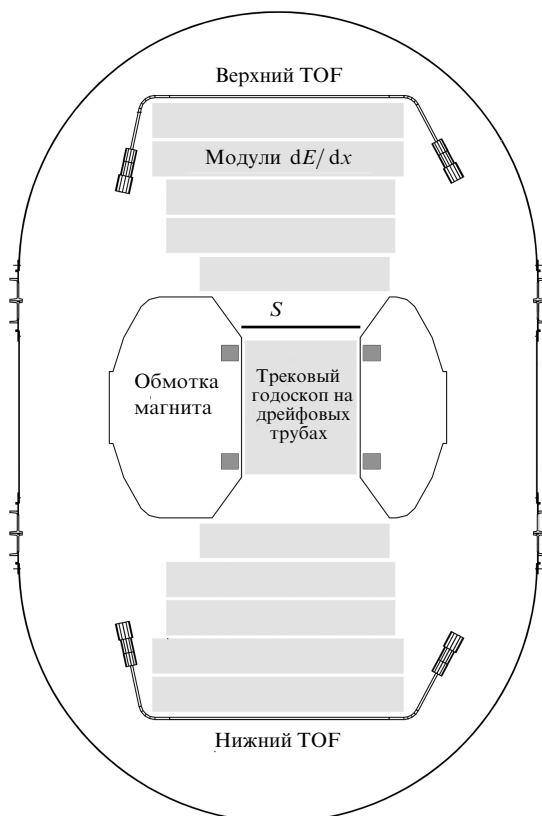


Рис. 25. Схема магнитного спектрометра HEAT-pbar [172].

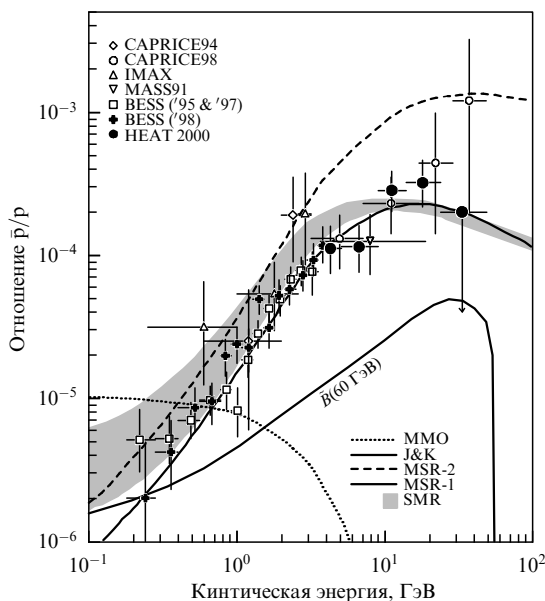


Рис. 26. Отношение потоков антипротонов и протонов, измеренное в эксперименте HEAT-pbar, в сравнении с результатами других экспериментов и моделями первичного и вторичного образования [172].

Несмотря на то, что результаты баллонных экспериментов остаются противоречивыми (см. рис. 26) и не позволяют сделать однозначный вывод о природе происхождения космических антипротонов, в некоторых из них обнаружено свидетельство возможного вклада дополнительных, не вторичных, источников античастиц [143]. Тем не менее непродолжительное время проведения баллонных экспериментов и наличие остаточной

атмосферы не позволили продвинуться по энергии дальше  $\sim 50$  ГэВ в наблюдениях. Совокупность этих факторов затрудняет восстановление энергетического спектра, особенно для высоких энергий, а значит и проверку теоретических моделей происхождения антипротонов.

**3.1.3. AMS-01.** Следующим этапом в изучении космических античастиц стало развитие орбитальных миссий, таких как AMS и PAMELA, оснащённых высокоточной измерительной аппаратурой и выведенных на околоземную орбиту. Прямые измерения в космосе обеспечивают ряд ключевых преимуществ по сравнению с баллонными экспериментами: значительно большую экспозицию и длительность наблюдений (в экспериментах PAMELA и AMS-02), отсутствие остаточной атмосферы над детектором, что исключает фон от вторичных атмосферных частиц, а также возможность регистрации частиц в более широком энергетическом диапазоне — вплоть до сотен ГэВ. Это открыло возможность проверить модели происхождения античастиц и наложить ограничения на сценарии их происхождения.

Эксперимент AMS (Alpha Magnetic Spectrometer) был направлен на исследование античастиц в космических лучах, проводился в июне 1998 г. в полёте STS-91 [173]. На схематическом изображении научной аппаратуры в отклоняющей проекции (рис. 27) показаны: магнит, трековая система (трекер), времяпролётные счётчики, черенковский детектор и детектор антисовпадений.

Геометрический фактор спектрометра составляет  $0,3 \text{ м}^2 \text{ ср}$ . Траектория заряженной частицы, проходящей в магнитном поле, создаваемом постоянным магнитом напряжённостью  $0,14 \text{ Тл}$ , регистрировалась трекером, состоящим из 6 плоскостей и двухсторонних кремниевых микростриповых детекторов. По искривлению траектории определялись магнитная жёсткость частицы и знак заряда. Разрешение времяпролётной системы  $115 - 125 \text{ пс}$  в зависимости от длины конкретного счётчика. Измерения скорости независимо выполнялись времяпролётной системой на основе сцинтилляционных детекторов и черенковским детектором. Сцинтилляционные счётчики детектора антисовпадений покрывают внутреннюю поверхность магнита и служат для подавления фоновых событий.

В результате проведённого анализа в эксперименте AMS-01 было зарегистрировано  $186 \pm 28$  антипротонов [173]. По этим данным с учётом геометрического фактора, эффективности регистрации, времени наблюдения и процедуры восстановления спектра (декомпозиция или unfolding) получен поток первичных антипротонов в зависимости от кинетической энергии. На рисунке 28 представлено сравнение этого потока с данными эксперимента BESS95 + 97 [149].

Спектры AMS-01 [173] и BESS согласуются в пределах погрешностей в энергетическом диапазоне от  $0,5$  до  $2 \text{ ГэВ}$ . Поскольку оба этих эксперимента проводились в условиях солнечного минимума, это минимизирует влияние солнечной модуляции и позволяет сравнивать данные напрямую. AMS-01 подтвердил, что при минимуме солнечной активности (1995 – 1998 гг.) форма и величина спектра антипротонов вблизи  $2 \text{ ГэВ}$  практически не изменяются, что соответствует предсказаниям моделей солнечной модуляции, например, моделей Фиска и Симона с параметром  $\phi = 500 \text{ МВ}$  [145, 169].

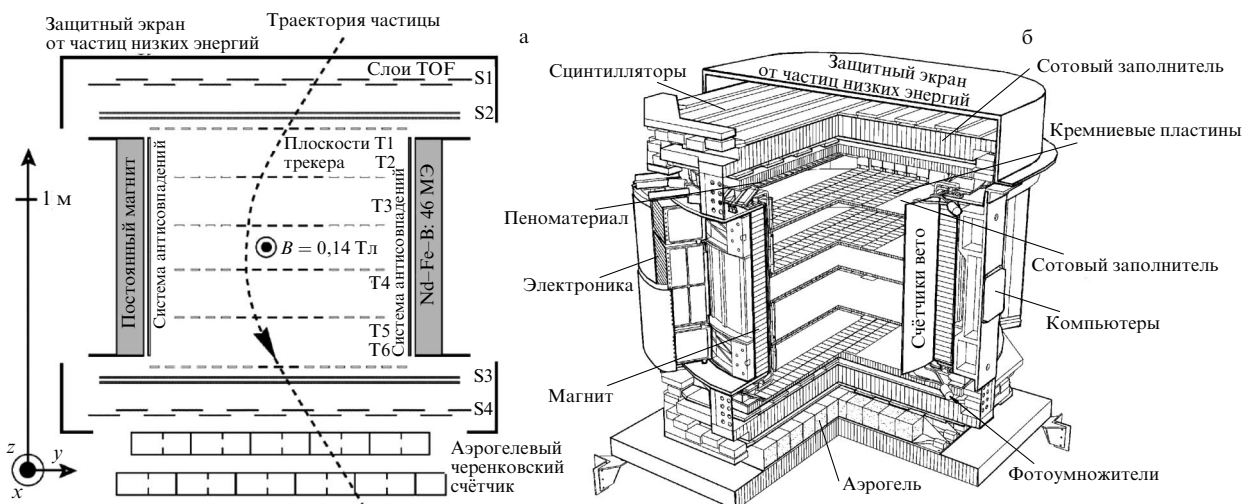


Рис. 27. Схематическое изображение спектрометра AMS-01 на STS-91. (а) Постоянный магнит, плоскости кремниевого микрострипового трекера T1 – T6, времяпролётные счётчики S1 – S4 (ToF), черенковский счётчик, детектор антисовпадений (ACC) и защита от частиц низкой энергии (LEPS). (б) Изометрический вид детектора AMS-01. Показаны некоторые элементы конструкции, такие как соты и пенопласт, а также расположение ящиков для электроники [173].

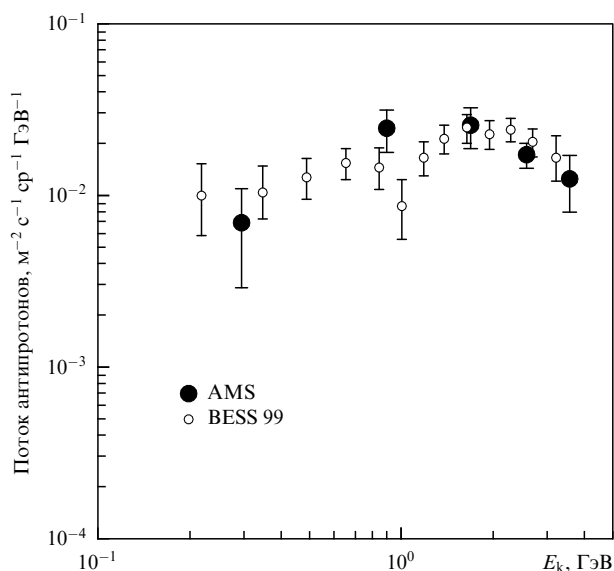


Рис. 28. Поток антипротонов по данным AMS в сравнении с измерениями BESS 99 [173].

В спектре антипротонов, полученном в AMS-01, не наблюдается их избытка при низких энергиях, что накладывает ограничения на вклад первичных источников, таких как аннигиляция тёмной материи или испарение первичных чёрных дыр [40, 174] и указывает на их вторичное происхождение. Таким образом, результаты AMS-01 укрепили доверие к моделям вторичного происхождения и солнечной модуляции, и послужили основой для последующих точных измерений в экспериментах PAMELA и AMS-02.

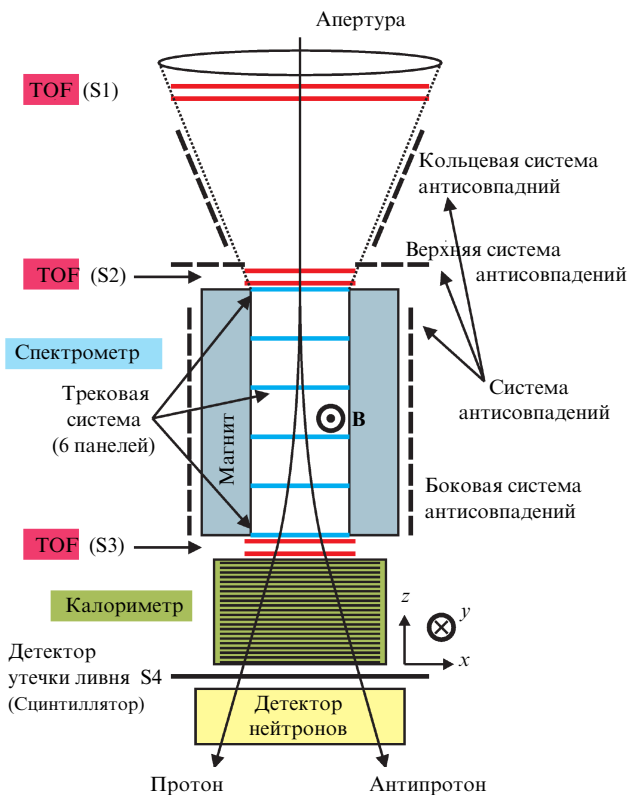
**3.1.4. PAMELA.** В 2006 г. начал свою работу спутниковый эксперимент PAMELA [14, 166, 175], предназначенный для изучения потоков заряженных частиц в космическом излучении, особое внимание уделялось измерению потоков античастиц. Среди основных задач были прецизионные измерения энергетических спектров антипротонов и позитронов в диапазоне энергий от сотен МэВ до

сотен ГэВ в первичном космическом излучении, а также поиск антиядер.

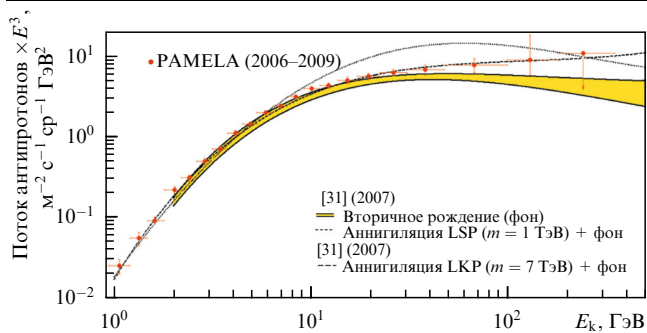
Спектрометр PAMELA включает комплекс детекторов, служащих для идентификации типа частицы, измерения величины и знака заряда, жёсткости, скорости, массы и энергии частиц [176]. В состав научной аппаратуры входят: магнитный спектрометр, включающий в себя постоянный магнит и трекер; координатно-чувствительный электромагнитный калориметр; система сцинтилляционных времяпролётных счётчиков; система сцинтилляционных счётчиков антисовпадений; нижний сцинтилляционный ливневый детектор; нейтронный детектор (рис. 29).

Магнитный спектрометр содержит постоянный магнит, создающий напряжённость поля 0,43 Тл, внутри которого размещена кремниевая трековая система с геометрическим фактором  $21,5 \text{ см}^2 \text{ ср}$  и максимальной измеряемой жёсткостью до 1 ТВ [176, 177]. Плоскости сцинтилляторов времяпролётной системы (ВПС) установлены над и под магнитом, обеспечивая первичный экспериментальный триггер. Временное разрешение времяпролётной системы позволяет идентифицировать альбедные частицы, а также осуществлять протон/антипротон – электрон/позитронное разделение для частиц с импульсом менее  $1,5 \text{ ГэВ } c^{-1}$ . Электромагнитный калориметр, расположенный под магнитом, измеряет энергии падающих электронов и позволяет проводить топологический отбор между электромагнитным и адронным ливнями (или невзаимодействующими частицами). Сцинтилляционная система под калориметром используется для идентификации высокоэнергичных электронов и дополняется нейтронным детектором. Спектрометр окружён пластиковым сцинтилляционным экраном системы антисовпадений для исключения из анализа событий вне апертуры прибора.

До запуска PAMELA более-менее надёжные результаты о потоках антипротонов получены лишь в диапазоне до десятка ГэВ. При более высоких энергиях они или отсутствовали (свыше 40 ГэВ), или имели ошибки, не позволяющие сделать выбор в пользу одной из теоретических моделей. На рисунке 30 приведён спектр анти-



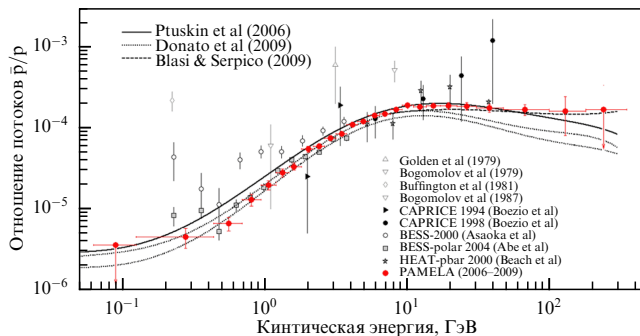
**Рис. 29.** Схематическое изображение спектрометра PAMELA: время-пролётная система (ToF); система антисовпадений (CARD, CAT, CAS); координатная трековая система (трекер); постоянный магнит; координатно-чувствительный калориметр; сцинтилляционный ливневый детектор (S4); нейтронный детектор [176].



**Рис. 30.** Интенсивность антипротонов, умноженная на  $E^3$ . Жёлтая полоса показывает неопределённость в потоке вторичных антипротонов для различных моделей диффузии в межзвёздной среде. Пунктирная и штриховая линии соответствуют сигналам, вызванным аннигиляцией гипотетических частиц тёмной материи в различных моделях [176].

протонов, умноженный на  $E^3$  для визуального выделения отклонений, в сравнении с предсказаниями вторичного происхождения (жёлтая область) и с теоретическими расчётами потоков от аннигиляции частиц тёмной материи: SUSY ( $\sim 1$  ТэВ) (пунктирная линия) и Калуцы – Клейна ( $\sim 7$  ТэВ) (штриховая линия) [178].

Эксперимент PAMELA показал, что начиная с энергий  $\sim 20-30$  ГэВ потоки антипротонов находятся на верхней границе или выше моделей их вторичного происхождения. Это не исключает вклад первичных источников — например, аннигиляции частиц тёмной материи, особенно при наличии механизмов усиления потока [179].



**Рис. 31.** Отношение потоков антипротонов и протонов в первичных космических лучах по данным спектрометра PAMELA и других экспериментов [176].

Аналогичный избыток ранее наблюдался в спектре позитронов [180], что также интерпретировалось как возможный сигнал от частиц тёмной материи и усиливало аргументы в её пользу как потенциального источника.

На рисунке 31 показано отношение потоков антипротонов и протонов в зависимости от кинетической энергии, полученное в эксперименте PAMELA в сравнении с результатами предыдущих экспериментов [17, 61, 128, 130, 140, 143, 149, 150, 158, 172, 181]. Проведено сравнение данных PAMELA с теоретическими расчётами в модели вторичного происхождения антипротонов в Галактике и плоской диффузии в межзвёздной среде [182] (сплошная линия) и предсказываемой неопределённостью расчётного потока вторичных антипротонов, связанной с их рождением и диффузией в Галактике в работе [37] (пунктирные линии).

В эксперименте PAMELA впервые измерен спектр галактических антипротонов с высокой точностью в широком энергетическом диапазоне до 350 ГэВ. Его результаты подтвердили доминирование вторичного происхождения антипротонов в широкой области энергий, но не исключили возможный вклад тёмной материи на высоких энергиях. Эти данные стали основой для последующих прецизионных исследований античастиц в экспериментах AMS-02 [15] и DAMPE [183].

**3.1.5. AMS-02.** Следующим значительным шагом в изучении потоков античастиц стало проведение эксперимента AMS-02. Научная аппаратура эксперимента AMS-02 представляет собой улучшенную версию предшественника и является прецизионным магнитным спектрометром, который был запущен в космос 16 мая 2011 г. на борту шаттла "Индевор" (STS-134) и через три дня установлен на борту международной космической станции (рис. 32) [184]. Благодаря такой постановке эксперимента появляется возможность ремонта и модернизации прибора, что способствует его длительной эксплуатации.

Основными целями эксперимента AMS-02 являются прецизионные измерения потоков космических лучей, включая античастицы, поиск антиядер с  $A > 1$ , а также обнаружение возможных сигналов аннигиляции или распада частиц тёмной материи.

Схема детектора AMS-02 с указанием основных элементов и их функций представлена на рис. 33 [184]. Спектрометр позволяет идентифицировать частицы и ядра по их заряду, энергии и импульсу или магнитной

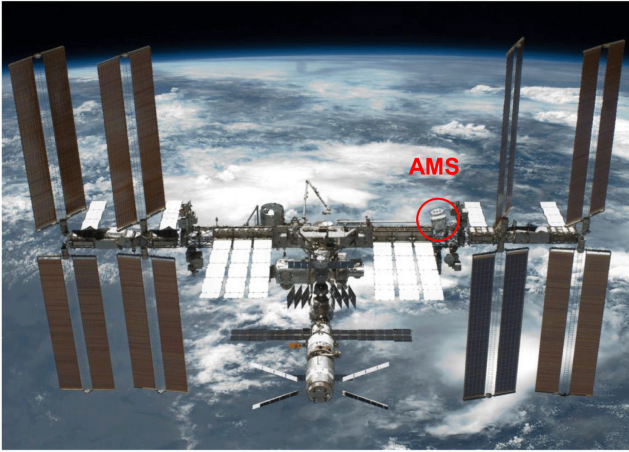


Рис. 32. Спектрометр AMS-02 на борту МКС [184].

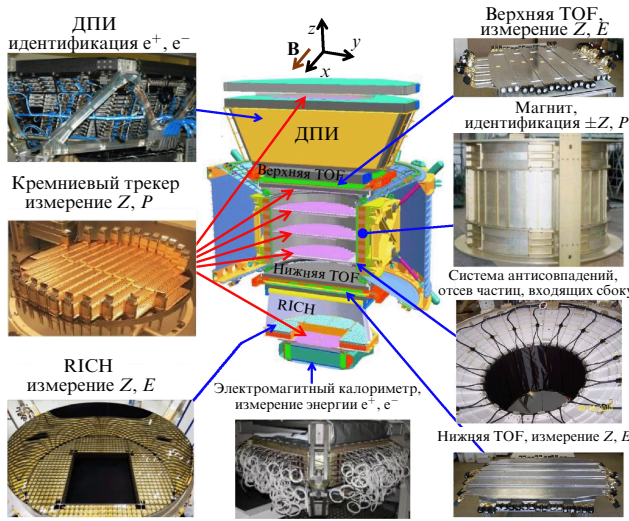


Рис. 33. Схема детектора AMS-02 [184].

жёсткости, которые измеряются независимо трековой системой в магнитном поле (трекером, Tracker), время-пролётной системой (ToF), кольцевым черенковским детектором (RICH) и электромагнитным калориметром (ECAL). Счётчики системы антисовпадений (ACC), расположенные в отверстиях магнита, используются для отсеивания частиц, попадающих в AMS вне апертуры (сбоку) [184].

По данным AMS-02, опубликованным в 2016 г. [15], зарегистрировано  $3,49 \times 10^5$  антипротонов и  $2,42 \times 10^9$  протонов. Согласно публикации 2025 г., статистика увеличилась до  $1,1 \times 10^6$  антипротонов в диапазоне жёсткостей от 1,00 до 41,9 ГВ [45], что стало возможным благодаря регистрации более  $2 \times 10^{11}$  космических событий. Эти данные охватывают почти полный 11-летний цикл солнечной активности, включая инверсию магнитного поля Солнца и начало нового цикла.

Дополнительно, согласно результатам, опубликованным в 2021 г., в эксперименте AMS-02 было зарегистрировано  $5,6 \times 10^5$  антипротонных событий. Это позволило получить спектр антипротонов и отношение антипротонов к протонам в расширенном диапазоне жёсткостей от 1 до 525 ГВ [184]. Полученные данные согласуются с результатами, опубликованными в 2016 г. [15], но отличаются более высокой статистикой и точ-

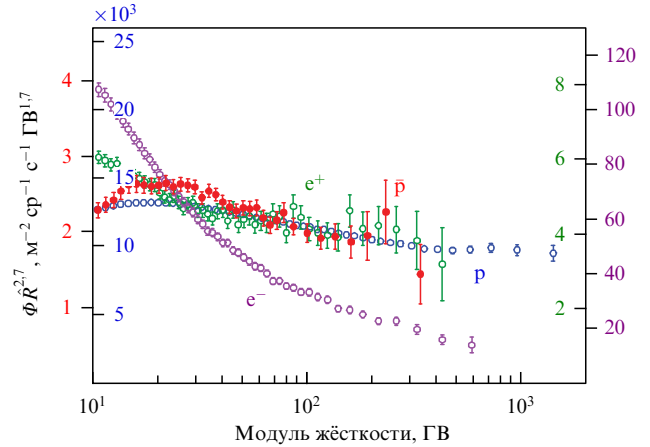


Рис. 34. Поток антипротонов (красный, левая ось) по сравнению с потоком протонов (синий, левая ось), потоком электронов (фиолетовый, правая ось) и потоком позитронов (зелёный, правая ось) [15].

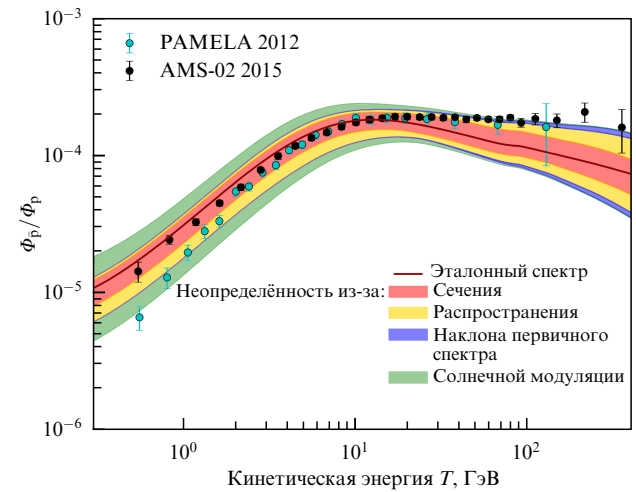


Рис. 35. Отношение потоков антипротонов и протонов в космическом излучении по данным PAMELA [176] и AMS-02 [24].

ностью, что позволило существенно улучшить детализацию спектра и провести анализ влияния солнечной модуляции.

На рисунке 35 показана доля антипротонов в космических лучах с энергией вплоть до 500 ГэВ по данным экспериментов PAMELA и AMS-02 в сравнении с теоретическими предсказаниями.

Опубликованное в эксперименте AMS-02 отношение потока антипротонов к суммарному потоку протонов и антипротонов подтверждает опубликованные результаты эксперимента PAMELA, однако при этом значительно увеличена статистика и расширен энергетический диапазон [14, 166, 175].

На рисунках 36 и 37 представлены спектры и отношение потоков антипротонов и протонов, полученные AMS-02, в сравнении с результатами экспериментов PAMELA и BESS-Polar II [184].

Анализ показал, что форма отношения антипротон/протон не демонстрирует ожидаемого снижения на высоких жёсткостях, что было бы характерно при чисто вторичном происхождении антипротонов. Это наблюдение вызвало теоретические споры относительно возможного вклада первичных источников, таких как аннигиляция тёмной материи. После публикации спектра антипротонов AMS-02 была предложена серия теоретических

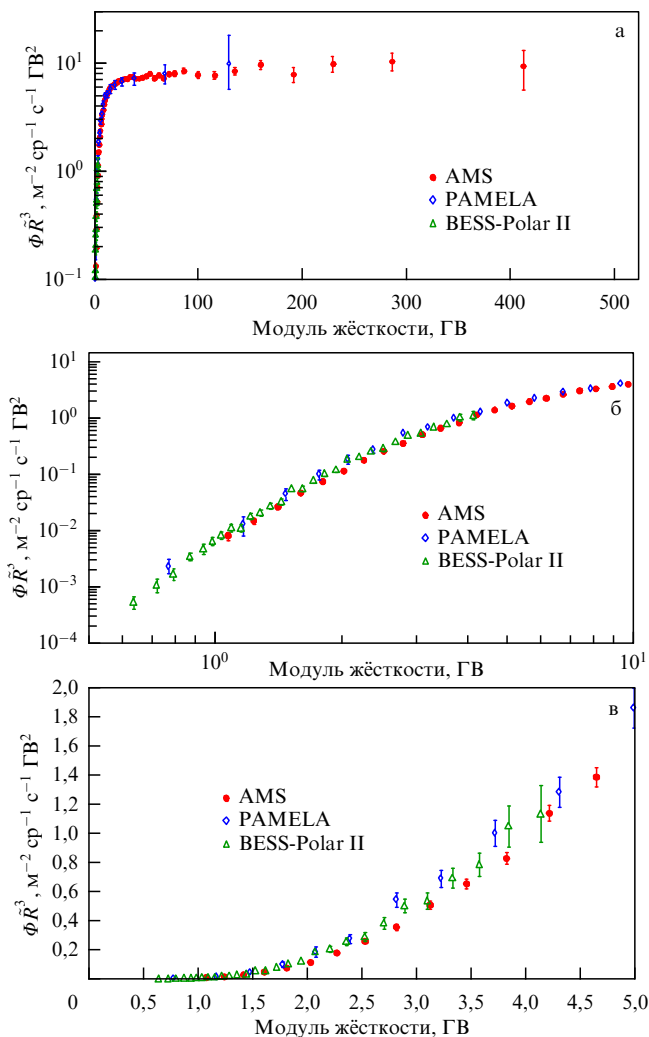


Рис. 36. Спектр антипротонов в космическом излучении по данным AMS-02 [184], PAMELA [176] и BESS-Polar II [160].

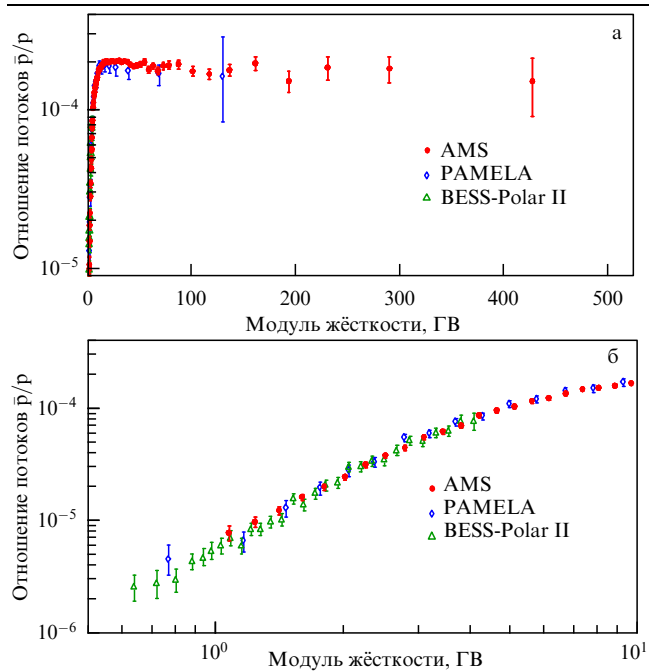


Рис. 37. Последние результаты AMS-02, BESS-Polar II [160] и PAMELA [176]: (а) отношение потоков антипротонов и протонов, (б) отношение антипротонов к протонам в области низкой жёсткости (< 10 ГВ) [184].

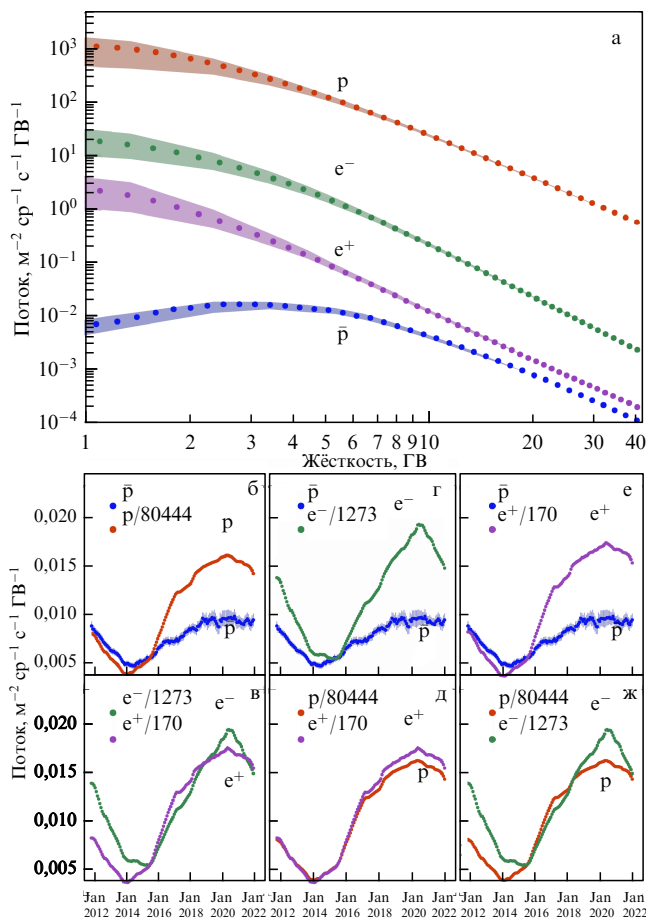


Рис. 38. (а) Показан поток антипротонов (синий) вместе с потоками протонов (красный), электронов (зелёный) и позитронов (фиолетовый). Все потоки приведены к единой относительной шкале для наглядного сравнения амплитуд модуляции. (б, в) Показано сравнение потоков частиц с противоположным зарядом, но одинаковой массой; (г, д) сравниваются частицы с одинаковым зарядом, но разной массой; (е, ж) проиллюстрированы различия в модуляции между античастицами и частицами [45].

работ, объясняющих наблюдаемые особенности с привлечением стандартных и новых астрофизических сценариев [22–24, 185–198]. Эти работы представляют различные модели распространения космических лучей и сценарии аннигиляции тёмной материи, давая качественно различающиеся предсказания по форме и величине спектра антипротонов в области высоких энергий.

На рисунке 37б представлен фрагмент спектра в области низкой жёсткости (< 10 ГВ), где влияние солнечной модуляции наиболее существенно. Модуляция обусловлена взаимодействием заряженных частиц с солнечным ветром и магнитным полем Солнца, что приводит к изменению формы спектра, особенно в минимуме цикла солнечной активности.

Особый интерес представляет анализ поведения отношения потоков антипротонов и протонов в области высоких энергий. Экспериментальные данные AMS-02 [45], представленные на рис. 38, показывают отсутствие ожидаемого резкого спада этого отношения при энергиях выше 10 ГВ, что противоречит предсказаниям стандартных моделей вторичного происхождения антипротонов [30, 199]. Этот эффект особенно заметен при сравнении с данными PAMELA и BESS-Polar II на рис. 36, где теоретические кривые для чисто вторичных антипротонов предсказывают более быстрое уменьшение отноше-

ния антипротонов и протонов с ростом энергии, чем показано на рис. 35.

Поток антипротонов демонстрирует существенно меньшую амплитуду временных вариаций по сравнению с другими элементарными частицами, что указывает на важную роль формы спектра в солнечной модуляции [45]. В результате анализа более чем миллиона событий в диапазоне жёсткостей от 1 до 41,9 ГВ установлено, что поведение потока антипротонов ( $\bar{p}$ ) существенно отличается от потоков других элементарных частиц: протонов ( $p$ ), электронов ( $e^-$ ) и позитронов ( $e^+$ ). Амплитуда временной модуляции потока антипротонов значительно меньше, чем у протонов, электронов и позитронов. При этом между потоками антипротонов и протонов наблюдается выраженный эффект гистерезиса, тогда как между  $p$  и  $e^-$  устанавливается линейная корреляция. Это подчёркивает важность знака заряда в процессах солнечной модуляции.

Кроме того, с помощью независимого от модели анализа была выявлена универсальная зависимость между формой спектра жёсткости и амплитудой временных вариаций потоков. Эта зависимость одинаково справедлива как для положительно, так и для отрицательно заряженных частиц. Установлено, что частицы с более крутым спектром демонстрируют меньшую амплитуду модуляции при прочих равных условиях [45].

Полученные результаты предоставляют уникальную информацию о влиянии массы, заряда и формы спектра на процессы транспортировки заряженных частиц в гелиосфере. Они также служат важной основой для интерпретации происхождения космических антипротонов и уточнения моделей космической радиации.

**3.1.6. GAPS.** В настоящее время ведётся активная подготовка к запуску баллонного эксперимента GAPS (General AntiParticle Spectrometer), целью которого является поиск антипротонов, антидейтронов и изотопов антигелия в составе космических лучей с энергией менее 0,25 ГэВ/нуклон. Детектор использует уникальный метод регистрации антиядер: после замедления до скорости  $\beta \approx 0,2-0,5$  в кремниевой мишени антинуклон захватывается ядром и образует экзотический атом, находящийся в сильно возбуждённом состоянии. Далее происходит последовательное испускание оже-электронов и характеристического рентгеновского излучения, спектр которого зависит от типа захваченной частицы. Завершается процесс аннигиляцией антиядра, в результате которой в детекторе фиксируются несколько пионов и протонов. Идентификация сигнала основана на совместном анализе времени пролёта (ToF), спектра рентгеновского излучения и траекторий продуктов аннигиляции, что обеспечивает способность прибора надёжно различать редкие события, ассоциированные с регистрацией антиядер, а также подавление фона [200]. Принцип регистрации проиллюстрирован на рис. 39.

Научные цели эксперимента включают прецизионное измерение спектра низкоэнергетических антипротонов в диапазоне от 0,07 до 0,21 ГэВ, поиск антидейтронов с чувствительностью, превосходящей текущие ограничения на 1–2 порядка, и возможное обнаружение антигелия-3, что станет прямым указанием на нестандартные механизмы формирования антиядер космических лучей, включая аннигиляцию тёмной материи [201–203].

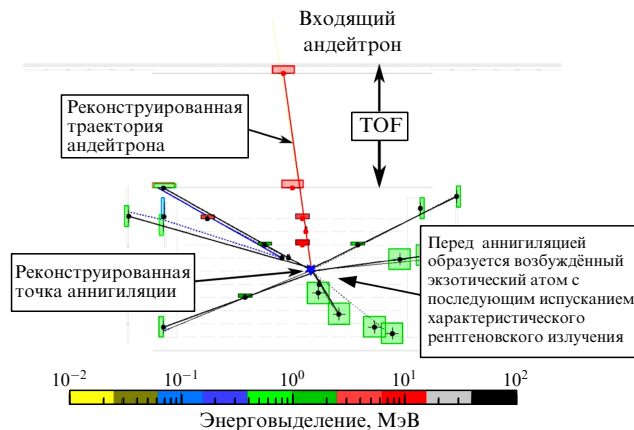


Рис. 39. Схема регистрации антиядер в установке GAPS на примере  $\bar{d}$ :  $\bar{d}$  аннигилирует с образованием экзотического атома, что приводит к конечному состоянию с несколькими пионами [201].

По состоянию на 2025 г. инструмент GAPS прошёл полную интеграцию и наземную калибровку в антарктической баллонной лаборатории McMurdo. Было подтверждено соответствие всех ключевых технических параметров: стабильная работа системы охлаждения, энергетическое разрешение рентгеновских каналов порядка 4 кэВ и высокая эффективность триггера ToF. Однако первая попытка запуска 1 января 2025 г. была прервана из-за повреждения полезной нагрузки и неблагоприятных погодных условий. Повторные запуски в начале января также оказались невозможны из-за сильных ветров, и кампания была официально перенесена на сезон 2025–2026 гг. [203, 204]. При успешном запуске GAPS обеспечит беспрецедентную статистику событий и откроет новое окно для регистрации антиматерии и потенциальных сигналов тёмной материи.

**3.1.7. AMS-100.** AMS-100 — это международный проект по созданию магнитного спектрометра, предназначенного для измерения ядер и антиядер космических лучей, который планируется разместить в точке Лагранжа L2 системы Солнце–Земля. Основной задачей установки является прямое измерение спектров заряженных частиц и фотонов в ранее недостижимых энергетических диапазонах — вплоть до  $10^{16}$  эВ для ядер и до 10 ТэВ для электронов и позитронов [205]. Особое внимание будет уделено поиску античастиц с массовым числом  $A > 1$ , таких как антигелий и антидейтроны, обнаружение которых может служить уникальными индикаторами аннигиляции или распада тёмной материи.

Спектрометр AMS-100 включает в себя несколько детекторных систем (рис. 40), размещённых внутри тонкостенного сверхпроводящего соленоида. Магнитная система на основе REBCO-лент (высокотемпературных сверхпроводников) создаёт однородное магнитное поле напряжённостью 1 Тл, обеспечивая отклонение заряженных частиц, что позволяет определять их импульс и знак заряда. Внутри соленоида размещается кремниевый трекер с пространственным разрешением до 5 мкм и максимальной измеряемой жёсткостью до 100 ТВ, что позволит восстанавливать траектории частиц с высокой точностью. За ним следует калориметр на основе кристаллов LYSO глубиной 70 радиационных (или 4 ядерных) длин, позволяющий измерять энергетическое выделение за-

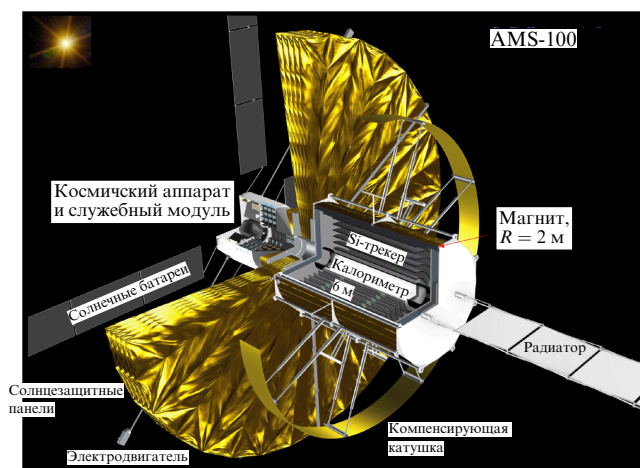


Рис. 40. Концептуальная схема спектрометра AMS-100 [205].

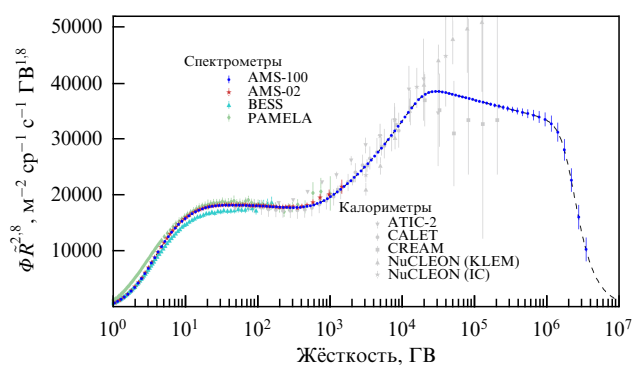


Рис. 41. Энергетический спектр протонов космических лучей. Синие точки — ожидаемые данные AMS-100 [206], красные звёзды — AMS-02 [207], зелёные треугольники — BESS-Polar [161], зелёные ромбы — PAMELA [208], серые треугольники — ATIC-2 [209], серые точки — CALET [210], серые квадраты — CREAM [211].

раженных и нейтральных частиц. Внешние слои детектора включают трекары на сцинтиллирующих волокнах (SciFi) и систему измерения времени пролёта (ToF) с планируемым разрешением 15–20 пс, что особенно важно для различения изотопов частиц и античастиц [206].

На рисунке 41 приведены ожидаемые измерения энергетического спектра протонов, которые AMS-100 сможет выполнить с высокой статистической точностью. Сравнение с результатами предыдущих миссий — AMS-02 [207], PAMELA [208], BESS-Polar [161], ATIC-2 [209], CALET [210], CREAM [211] — показывает, что AMS-100 позволит продлить измерения до энергий выше  $10^{15}$  эВ, т.е. за пределы колена в спектре космических лучей [205]. Пунктирная кривая на графике соответствует модельному спектру с несколькими сглаженными изломами, иллюстрируя потенциал спектрометра в выявлении сложных структур, обусловленных переходом от галактических к внегалактическим источникам или особенностями распространения частиц в межзвёздной среде.

Также было проведено сравнение моделирования энергетического спектра антипротонов с данными экспериментов BESS-Polar, PAMELA, AMS-02 (рис. 42). Синими точками показаны ожидаемые данные от AMS-100, рассчитанные на основе теоретической модели [193] потока антипротонов (до 10 ТэВ) с указанием только статистических неопределённостей. Сравнение прогноза этой модели с данными моделирования AMS-100 позво-

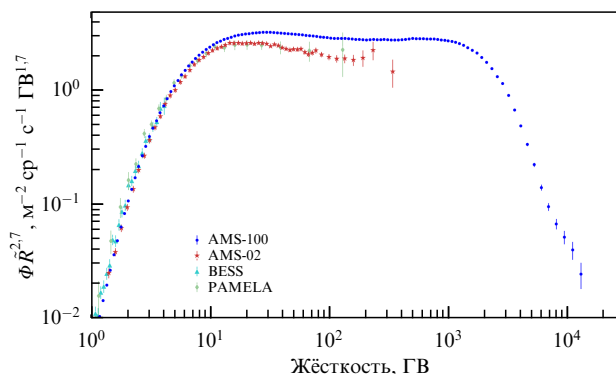


Рис. 42. Энергетический спектр антипротонов космических лучей. Синие точки — ожидаемые данные AMS-100 [206], красные звёзды — AMS-02 [15], зелёные треугольники — BESS-Polar [164], зелёные ромбы — PAMELA [176].

лит либо подтвердить её, либо выявить вклад экзотических процессов (например, тёмной материи) в формирование спектра антипротонов [212].

Этот проект должен стать преемником AMS-02 и увеличить статистику зарегистрированных частиц в 1000 раз, благодаря геометрическому фактору  $100 \text{ м}^2 \text{ ср}$ . Спектрометр AMS-100 планируют запустить в 2039 г. Планируемый срок работы — не менее 10 лет.

Реализация проекта AMS-100 станет важным шагом в развитии наблюдательной астрофизики и физики космических лучей. Его научный потенциал охватывает широкий спектр задач — от уточнения существующих моделей до возможного открытия новых физических явлений. Уникальные технические параметры установки позволят рассчитывать на качественно новые результаты, способные существенно повлиять на наше понимание устройства Вселенной.

### 3.2. Антипротоны в составе альбедо Земли

Существует несколько процессов, которые рассматриваются как источник антипротонов в околоземном пространстве [49, 213]. Антипротоны могут образовываться при взаимодействии космических лучей с остаточными верхними слоями атмосферы Земли, например, в следующей реакции:  $p + p \rightarrow p + p + p + \bar{p}$  (прямое рождение антипротонов). Образовавшиеся таким образом антипротоны могут быть захвачены магнитным полем Земли, особенно если они возникают в зонах с подходящей геомагнитной конфигурацией. Это приводит к накоплению антипротонов во внутренней магнитосфере Земли, где формируется антипротонный пояс — аналог радиационных поясов Ван Аллена, но состоящий преимущественно из антипротонов.

Потоки антипротонов, образованных в результате прямого рождения антипротонов, на один–два порядка больше, чем поток антипротонов в составе ГКЛ. Максимум потока антипротонов, рождённых в этом источнике, приходится на область околоземного пространства с координатой Мак-Илвейна [214]  $L$  от 1,20 до 1,25, а пичч-угловое распределение потока имеет максимум при экваториальном пичч-угле  $90^\circ$  [213] ( $L$ -оболочка — величина, измеряемая в радиусах Земли и равная расстоянию от центра Земли до точки пересечения магнитной силовой линии плоскости геомагнитного экватора).

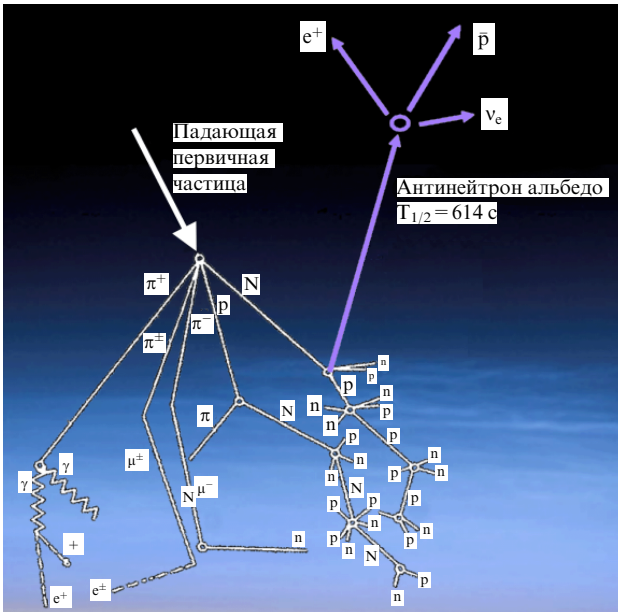


Рис. 43. Иллюстрация механизма CRANbarD.

Другим источником антипротонов является распад антинейтронов альbedo. Для альbedo и захваченных антипротонов этот механизм, получивший название CRANbarD (рис. 43), является наиболее значимым. Антинейтроны образуются в реакции  $p + p \rightarrow p + p + n + \bar{n}$ , которая протекает в атмосфере Земли. Магнитное поле не оказывает влияния на распространение антинейтронов, и это позволяет им попадать в запрещённые зоны, где они распадаются в реакции:  $\bar{n} \rightarrow \bar{p} + e^+ + \nu_e$ .

Поток антипротонов, образуемых в механизме CRANbarD, в тысячи раз больше и находится на больших  $L$ -оболочках по сравнению с прямым источником образования антипротонов ( $L \approx 1,4-1,5$ ) [215]. Таким образом, механизмы генерации и удержания вторичных античастиц в околоземной среде тесно связаны с особенностями магнитосферы Земли.

**3.2.1. PAMELA.** Орбита спутника Ресурс-ДК1 (наклон  $70^\circ$  и высота 350–610 км), на которой находился спектрометр, позволяла прибору PAMELA выполнять очень подробные измерения космического излучения в различных областях магнитосферы Земли, в том числе в области Бразильской магнитной аномалии (БМА), предоставляя информацию о природе и энергетических спектрах частиц и античастиц в широком диапазоне энергий.

В 2011 г. по результатам измерений в эксперименте PAMELA были впервые обнаружены антипротоны вторичного происхождения в околоземном пространстве, измерен энергетический спектр альбедной и захваченной компонент в диапазоне кинетических энергий от 80 до 750 МэВ (рис. 44), а также получено отношение потоков захваченных антипротонов и протонов (рис. 45) [46].

Данные спектрометра PAMELA показывают, что измеренный поток антипротонов, захваченных в БМА, превышает поток антипротонов, регистрируемых за пределами радиационных поясов (альbedo), и поток антипротонов галактических космических лучей в минимуме 23/24 цикла солнечной активности (отрицательная полярность  $A^-$ ) на четыре и три порядка соответственно.

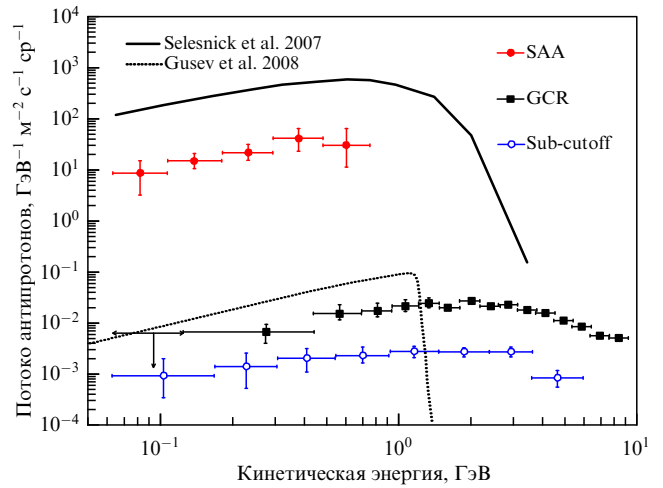


Рис. 44. Спектр антипротонов, измеренный в эксперименте PAMELA (2006–2009 гг.) в районе Бразильской магнитной аномалии (БМА, красные точки). Для сравнения показаны спектр антипротонов в атмосфере за пределами области БМА (альbedo, синие точки) и спектр антипротонов ГКЛ (чёрные точки) [46].

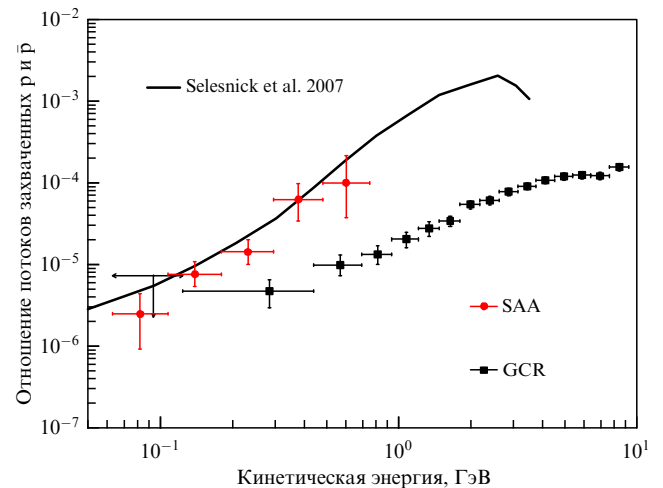


Рис. 45. Отношение захваченных антипротонов и протонов, измеренное в эксперименте PAMELA (2006–2009 гг.) в области БМА (красные точки) [46] и их теоретическое предсказание [49] (чёрная линия). Для сравнения показаны данные о соотношении антипротонов и протонов ГКЛ [166].

Проведено сравнение потока антипротонов, полученного в эксперименте PAMELA, с различными теоретическими моделями [49, 216, 217] (рис. 46) [215]. Эти модели опираются на два разных механизма: прямое рождение антипротонов в атмосфере Земли ( $p + p \rightarrow p + p + p + \bar{p}$ ) и распад антинейтронов, образованных в реакциях ( $p + p \rightarrow p + p + n + \bar{n}$ ), известный как механизм CRANbarD.

Согласно результатам моделирования, механизм CRANbarD объясняет значительно более высокие потоки антипротонов, наблюдаемые PAMELA, особенно в районе оболочек  $L \approx 1,4-1,5$ , в то время как вклад от прямого рождения ограничен более низкими  $L$ -оболочками ( $L \approx 1,2-1,25$ ) и меньшими потоками. Наибольшее соответствие между расчётами и экспериментом достигается в области энергий около 1 ГэВ, где совпадают как абсолютные значения потока, так и форма спектра. Однако для других участков спектра остаются расхождения,

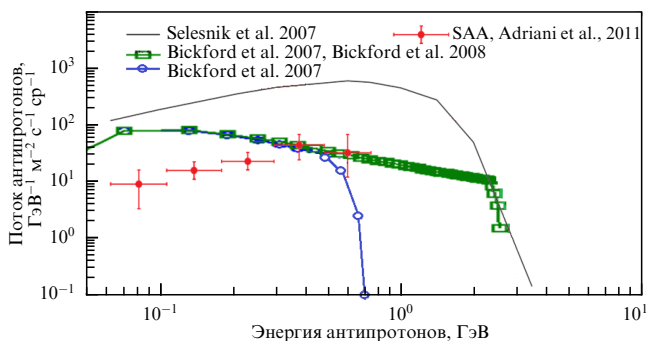


Рис. 46. Сравнение результатов расчётов [49, 216, 217] с данными эксперимента PAMELA [46].

которые могут быть обусловлены различиями в учёте питч-углового распределения антипротонов или локализации источников по *L*-оболочкам.

Несмотря на то, что теоретически предсказанный спектр захваченных антипротонов не совпадает во всех деталях с наблюдаемыми спектрами, отмечается их совпадение для энергии ~1 ГэВ.

**3.2.2. AFIS.** В рамках миссии Antiproton Flux in Space (AFIS) [218] в 2012 г. началась разработка небольшого детектора, предназначенного для измерения потока низкоэнергетических захваченных во внутреннем радиационном поясе Земли антипротонов. В основу измерений положена брэгговская спектроскопия в объёме активной мишени, состоящей из сцинтилляционных волокон, с анализом топологии "звезда", образующейся при аннигиляции антипротона в области остановки. Детектор предполагалось выполнить в форм-факторе CubeSat, и из-за небольших размеров, по расчётам, прибор должен быть чувствителен к энергиям античастиц от 25 до 100 МэВ, что позволяет расширить энергетический диапазон измерений приборов PAMELA в низкоэнергетичную часть спектра (рис. 47).

Калибровка на ускорителе и тестовый полёт прототипа на высотном аэростате состоялись к 2014 г., запуск

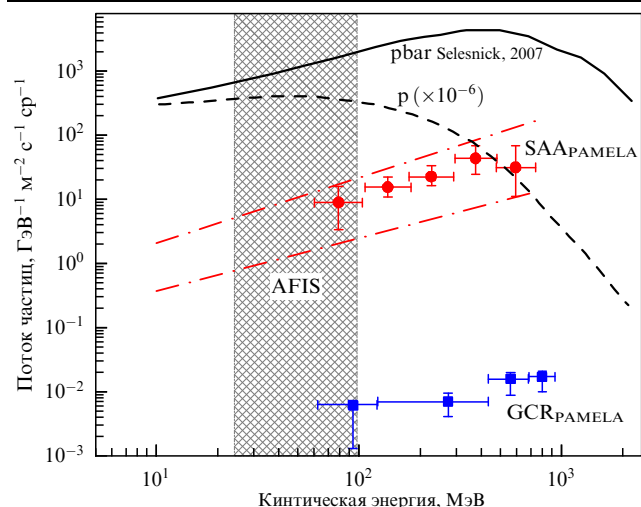


Рис. 47. Поток захваченных антипротонов в области БМА (красные точки), измеренные спектрометром PAMELA [46], и теоретические предсказания из работы [49] (чёрная линия). Ожидаемая область измерений AFIS показана серым цветом [218]. Синие точки (для сравнения) — потоки галактических антипротонов, полученные в эксперименте PAMELA [46].

прибора в космос планировался в 2018 г., но после 2015 г. новой информации о миссии AFIS не появлялось.

Дальнейшее изучение энергетических и пространственных распределений антипротонов, а также временной динамики их потока имеет ключевое значение для уточнения моделей генерации вторичных космических лучей и понимания механизмов их захвата в магнитосфере Земли. Измерение потока низкоэнергетических (в диапазоне от 25 до 100 МэВ) захваченных антипротонов позволит проверить достоверность существующих теоретических предсказаний [48, 50, 219], которые расходятся с результатами эксперимента PAMELA более чем на два порядка величины в этой области энергий [218].

#### 4. Поиск антипротонов с энергией больше 1 ТэВ

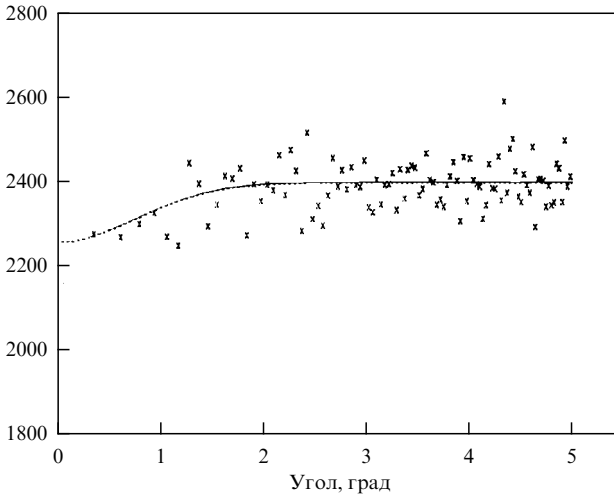
Прямое наблюдение антипротонов с энергией порядка ТэВ и выше в баллонных и спутниковых экспериментах затруднено из-за их малой распространённости в космических лучах. Для накопления минимальной статистики требуются на порядок больший геометрический фактор прибора или более длительное время экспозиции. По этой причине в литературе рассматривается альтернативный косвенный способ наблюдения антипротонов в экспериментах по регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ), используя тени Луны и Солнца.

Тенями Луны и Солнца называют уменьшение количества регистрируемых частиц космических лучей высокой энергии с направлений, соответствующих положению этих небесных тел, вследствие их поглощения. Впервые существование этого эффекта предположил Д. Кларк в 1957 г. [220], отметив возможность использования теней для изучения магнитного поля Луны и Солнца.

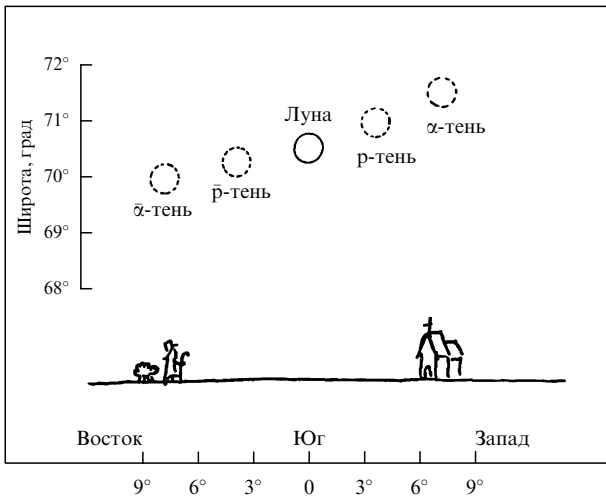
Долгое время прямые наблюдения не приводили к обнаружению теней Луны и Солнца вследствие малости эффекта и недостаточных характеристик измерительных установок. Впервые спад в потоке частиц, наблюдаемый с определённого направления, удалось надёжно зафиксировать в 1990 г. [221] в эксперименте Cugnus в Лос-Аламосе. Угловое разрешение измерительной установки составляло приблизительно 0,7°, тогда как угловые размеры Луны и Солнца на небе равны в среднем 0,52°. После накопления большой статистики событий статистическая значимость уменьшения потока космических лучей составила 4,9σ. На рисунке 48 показана угловая плотность  $dN/d\Omega$  событий в зависимости от углового расстояния от Луны или Солнца.

Измеренный дефицит согласуется с ожидаемым в предположении, что угловое разрешение описывается гауссовской моделью. Выход на плато в районе 1° соответствует угловому разрешению 0,75°.

Прямое наблюдение тени Луны позволило сделать следующий шаг — изучение заряженной компоненты космических лучей с большой энергией. Идея состоит в использовании Луны и Солнца в качестве коллиматоров. Поток космических лучей, проходящий через них, частично поглощается, а оставшиеся частицы в дальнейшем попадают в магнитное поле Земли, в результате чего положительно и отрицательно заряженные частицы в первом приближении отклоняются в противоположных направлениях. Тогда при наблюдении области неба, в которой ожидается дефицит частиц, будет заметно не одно сферическое изображение, соответствующее телу-



**Рис. 48.** Угловая плотность событий в зависимости от углового смещения от центра Луны или Солнца. Сплошная кривая соответствует плотности, предсказанной для гауссовского углового разрешения со стандартным отклонением 0,75° [221].

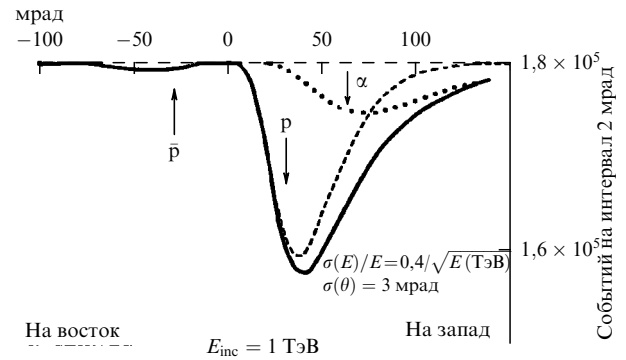
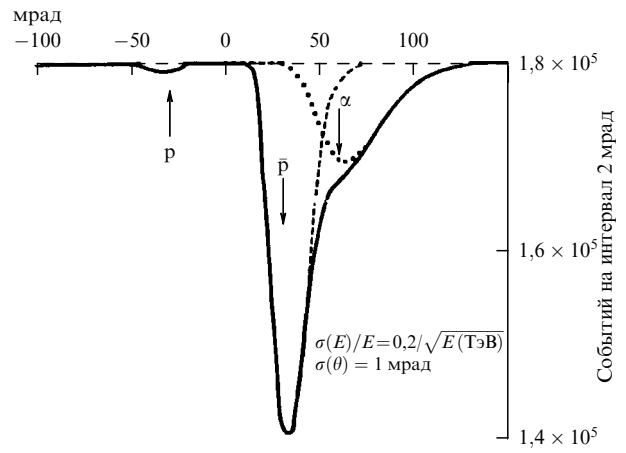


**Рис. 49.** Схема того, как будет выглядеть тень Луны в космических лучах с энергией 1 ТэВ [222].

препятствию, а несколько разнесённых или частично перекрывающихся друг друга (рис. 49).

В 1990 г. группа исследователей провела модельные оценки величины теней Луны в потоке различных частиц и степени их перекрытия [222]. Расчёт проводился для космических лучей с энергиями 1–10 ТэВ; магнитное поле Земли принималось за дипольное с рассчитанной ошибкой при таком приближении не более 10%. Отмечалось, что недипольной конфигурацией поля Земли на расстояниях больше 5 земных радиусов, а также галактическим и лунным магнитными полями можно пренебречь в силу их малой величины. Долговременные (несколько процентов в столетие) и кратковременные (~ 3% в течение нескольких часов) колебания геомагнитного поля также не учитывались, поскольку они не заметны при длительных измерениях космических лучей на протяжении нескольких месяцев.

Результаты расчётов представлены на рис. 50 для антипротонов, ядер гелия и протонов с энергиями 1 ТэВ. Процентное содержание частиц в потоке космических лучей принималось равным 1%, 25% и 50% соответственно.



**Рис. 50.** Моделирование тени Луны в потоках антипротонов, протонов и ядер гелия с энергиями 1 ТэВ для двух значений углового разрешения измерительной установки при наблюдении в течение года вблизи экватора [222].

Из графика видно, что ожидаемый сигнал от антипротонов имеет гораздо меньшую амплитуду, но при этом находится на заметном расстоянии от сигналов двух других частиц. Сигналы от положительно заряженных частиц при реалистичном разрешении перекрываются. Подобное поведение приводит к тому, что, с одной стороны, при большой накопленной статистике возникает возможность наблюдать тень, создаваемую антипротонами, но, с другой стороны, их процентное содержание относительно протонов становится невозможно оценить за счёт слияния последних с гелием.

**4.1. Tibet-ASγ**

Эксперимент Tibet ASγ одним из первых наглядно показал смещение лунной и солнечной теней относительно их истинных положений на небе [223]. Установка начала систематические наблюдения в начале 1990-х гг. в рамках программы поиска точечных гамма-источников и изучения космических лучей с энергией от нескольких ТэВ до ПэВ. Наземный комплекс из 45 сцинтилляционных детекторов развёрнут на регулярной сетке с шагом 15 м и обеспечивал угловое разрешение лучше 1° для событий с энергиями около 10 ТэВ, что позволило наблюдать тени Луны и Солнца в этом диапазоне.

В публикации 1993 г. положение Солнца рассчитывалось относительно Земли с учётом возмущений орбиты другими планетами и Луной, а координаты Луны — с учётом параллакса. Погрешности вычислений существенно меньше видимого диаметра диска и углового раз-

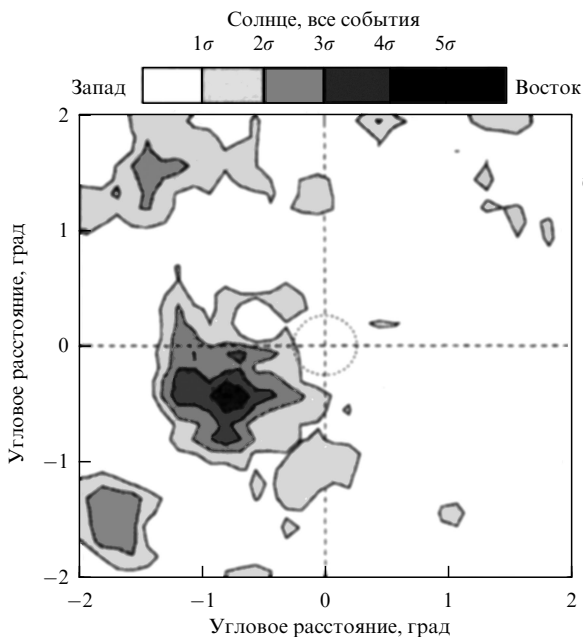


Рис. 51. Направления прихода событий в области  $4^\circ \times 4^\circ$  вокруг Солнца (круг пунктирной линией) [223].

решения установки. Наблюдаемое отклонение солнечной тени (рис. 51) интерпретируется как результат совместного воздействия магнитных полей Солнца, межпланетной среды и Земли. При дипольной аппроксимации солнечного поля (с индукцией 1 Гс на полюсах) оценка смещения для протонов с энергией 10 ТэВ даёт величину около  $0,3^\circ$ . Отклонение в геомагнитном поле оценивается в  $0,18^\circ$ . Вклад межпланетного магнитного поля сложен и зависит от его текущей конфигурации и солнечной активности.

Аналогичный анализ выполнен для Луны. На рисунке 52 представлены карта плотности событий и профили дефицита на полосе шириной  $1^\circ$  вдоль прямого восхождения (восток – запад) и склонения (юг – север) как функции углового расстояния от центра лунного диска. В обоих случаях заметно небольшое смещение тени относительно центра. Поскольку профиль лунной тени в направлении юг – север практически не подвержен геомагнитному отклонению, положение максимального дефицита вдоль этой оси можно использовать для оценки систематической ошибки: её величина составляет около  $0,1^\circ$ . В направлении восток – запад лунная тень расширена и систематически смещена к западу на угол около  $0,14^\circ$ , что в целом сопоставимо с величиной систематической ошибки. Оценка по процентному содержанию антипротонов в космических лучах в статье не приводилась.

**4.2. CASA**

В эксперименте CASA в 1994 г. наблюдались тени Луны и Солнца в космических лучах с энергией выше 100 ТэВ [224]. Наземная установка CASA состояла из 1089 сцинтилляционных детекторов, размещённых в виде квадратной сетки с шагом 15 м на общей площади  $0,23 \text{ км}^2$ . Каждый детектор состоял из четырёх отдельных сцинтилляционных счётчиков. На тот момент это был крупнейший комплекс по регистрации ШАЛ в своём классе установок (с сопоставимой плотностью размеще-

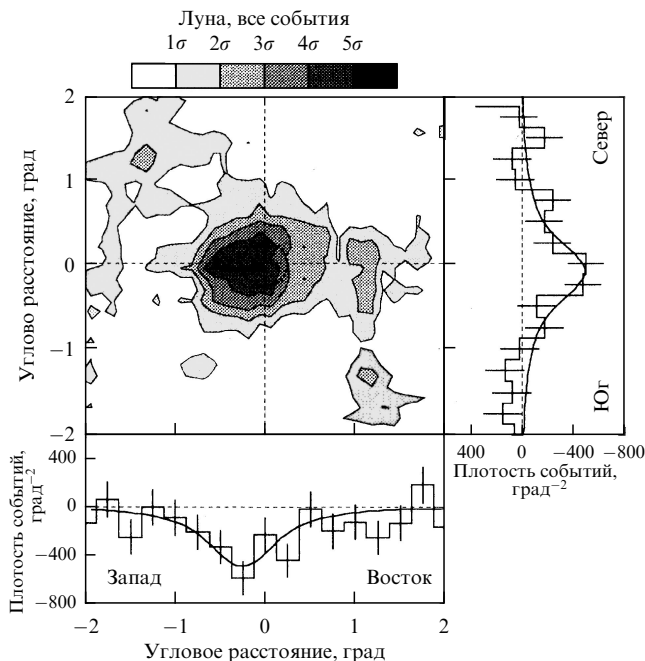


Рис. 52. Направления прихода событий в области  $4^\circ \times 4^\circ$  вокруг Луны. По внешней стороне карты приведены профили дефицита плотности событий в зависимости от углового расстояния от центра Луны на полосе шириной  $1^\circ$  вдоль прямого восхождения (запад – восток) и склонения (юг – север). Сплошные кривые показывают распределения плотности событий, ожидаемые при угловом разрешении установки  $0,87^\circ$  [223].

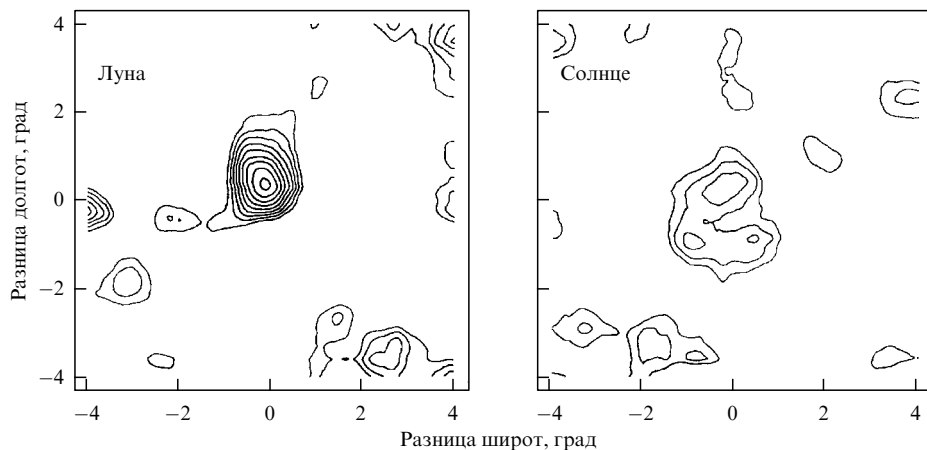
ния детекторов), что обеспечивало хорошее угловое разрешение и большую статистику событий.

За примерно год набора данных зарегистрировано около  $4,7 \times 10^6$  событий из направлений в окрестностях видимых положений Луны и Солнца (около 3,7% событий было исключено в процессе обработки). Для каждого тела оценивался дефицит космических лучей относительно среднего значения фона для данных областей. Хотя Солнце и Луна имеют одинаковый угловой размер на небе, образуемые ими тени различаются. На рисунке 53 показаны контурные карты плотности ливней для Луны (а) и Солнца (б) в эклиптической системе координат. Они построены путём вычитания из значений измеренного среднего фона гистограммы событий, пришедших с направлений соответствующих небесных тел. Линии равных уровней проведены через каждые  $-30$  событий/град<sup>2</sup>, начиная с  $-60$  событий/град<sup>2</sup>.

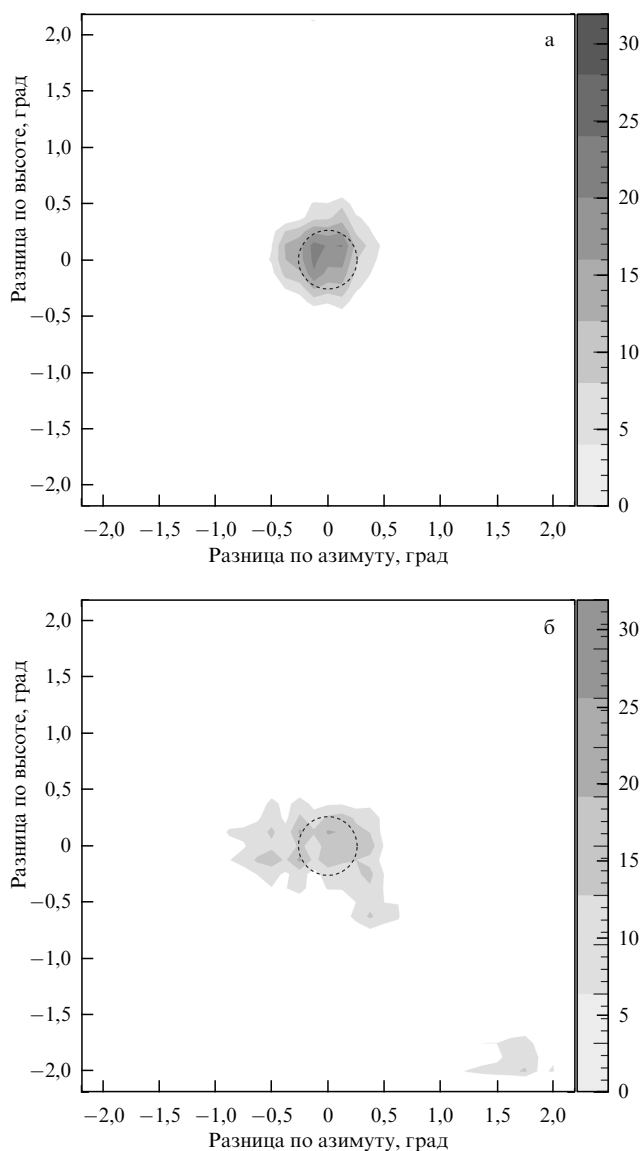
Эффект затенения для Солнца несколько менее выражен, чем для Луны. Лунная тень при этом симметрична и центрирована на положение Луны, тогда как солнечная тень нерегулярна. Авторы работы отмечают, что вероятной причиной этого является зависящее от жёсткости искривление траекторий космических лучей солнечным магнитным полем, что приводит к дополнительному отклонению частиц и размытию границ тени.

**4.3. MACRO**

Важным шагом в понимании влияния геомагнитных условий на форму и положение теней Луны в космических лучах стало исследование в эксперименте MACRO [225]. Исследования велись с использованием подземной установки путём регистрации мюонной компоненты космических лучей в период с 1989 по 2000 г. Значитель-



**Рис. 53.** Контурное распределение дефицита космических лучей от Луны (слева) и Солнца (справа). Ось абсцисс — разница эклиптических широт в градусах между осью ливня и положением объекта, ось ординат — разница долгот в градусах между осью ливня и положением объекта [224].



**Рис. 54.** Двумерное распределение  $\chi^2$  в ячейках с равным телесным углом. (а) Для ночных измерений, (б) дневных. Пунктиром указано видимое изображение Луны с радиусом порядка  $0,26^\circ$ . Значения  $\chi^2$  представлены на шкале справа [225].

ный промежуток времени между началом наблюдений и публикацией обусловлен необходимостью создания установки с улучшенными энергетическим и угловым разрешением, а также накопления достаточной статистики для анализа.

Особенностью анализа является изучение влияния времени суток на наблюдаемую тень Луны. Отбор событий был разделён на дневные и ночные периоды, в результате чего были построены карты, представленные на рис. 54. На нём отчётливо видно, что геомагнитное поле оказывает большее воздействие в дневное время, значительно искажая форму тени. В ночное время форма тени наиболее близка к идеальной симметрии, однако смещение центра тени присутствует и в дневных, и в ночных данных.

При анализе учитывалось, что в период наблюдений прошёл полный цикл солнечной активности — от максимума до минимума и обратно. При этом 62 % событий было зафиксировано во время, близкое к минимуму солнечной активности, когда нейтральный токовый слой был близок к плоскости эклиптики. Смещение центра лунной тени позволило установить верхний предел на соотношение антипротонов к протонам  $\bar{p}/p$ , который составил порядка 0,51 при уровне значимости 68 % или 0,62 при уровне значимости 90 % для энергий около 20 ТэВ.

#### 4.4. L3 + C

Более строгая оценка отношения антипротонов к протонам в космических лучах была получена в 2005 г. на мюонном спектрометре L3 + C детектора L3, установленного на Большом электрон-позитронном коллайдере ЦЕРН [226]. Проанализированы  $6,7 \times 10^5$  событий мюонов от ШАЛ, пришедших с направлений в пределах  $5,0^\circ$  вокруг Луны, где наблюдался эффект лунной тени в космических лучах.

Исследование проведено с использованием двух выборок: "высокоэнергетической" (HE) с энергией мюонов  $E_\mu > 100$  ГэВ и "низкоэнергетической" (LE) при  $65$  ГэВ  $< E_\mu < 100$  ГэВ. Для построения изображения лунной тени использована система координат, в которой наибольший дефицит в потоке космических лучей сконцентрирован вдоль одной из осей  $\theta_H$ . Получившиеся в ре-

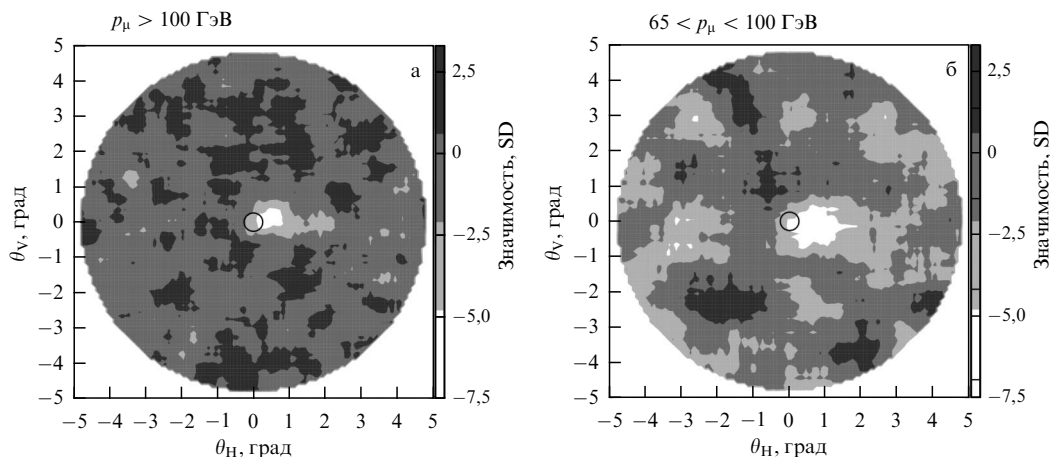


Рис. 55. Изображения лунной тени в высокоэнергетической выборке (а) и низкоэнергетической выборке (б). Окружностью отмечено истинное положение Луны. Вертикальная серая шкала показывает значимость в единицах стандартного отклонения; отрицательные значения соответствуют дефициту событий [226].

зультате изображения теней для обеих выборок по энергии представлены на рис. 55.

В случае выборки LE форма тени более вытянута, а её положение смещено дальше. Положение и форма связанного с Лунной дефицита событий главным образом зависят от отклонения первичной частицы, с которой ассоциируется каждый мюон выборки, земным магнитным полем и от эффективного углового разрешения установки. В предположении наличия второй тени, обусловленной присутствием антипротонов в космических лучах, установлен верхний предел на отношение потоков  $\bar{p}/p$ , равный 0,11 при уровне достоверности 90 % для энергии первичных частиц около 1 ТэВ.

#### 4.5. Tibet-III

В 2007 г. коллаборация Tibet-AS $\gamma$  опубликовала результаты наблюдения тени Луны в потоке космических лучей на установке Tibet-III [227]. Она представляет собой результат усовершенствования и расширения изначальной установки Tibet-I до Tibet-II в 1995 и 1996 гг. за счёт увеличения числа счётчиков и последующей модернизации до Tibet-III осенью 1999 г. В результате наземный комплекс включал в себя 533 сцинтилляционных детектора, расположенных на площади  $\sim 22050 \text{ м}^2$  в виде сетки с шагом 7,5 м. Такая плотная конфигурация позволила достичь исключительного углового разрешения — лучше  $0,9^\circ$  при энергиях  $\sim 3 \text{ ТэВ}$ , что является критически важным для задач гамма-астрономии и исследования тонких эффектов, таких как тени Луны и Солнца.

Главными научными задачами Tibet-III являлись измерение энергетического спектра всех частиц космических лучей и поиск особенностей в области "колена" спектра, исследование крупномасштабной анизотропии потока космических лучей, поиск и наблюдение дискретных источников гамма-излучения в ТэВ-диапазоне, а также использование метода лунной тени для поиска редких компонент космических лучей, таких как антипротоны. Метод тени Луны, активно использовавшийся коллаборацией, служил двум целям: независимой калибровки углового разрешения и эффективности работы всей установки, а также для поиска физических эффектов, связанных с отклонением заряженных частиц в магнит-

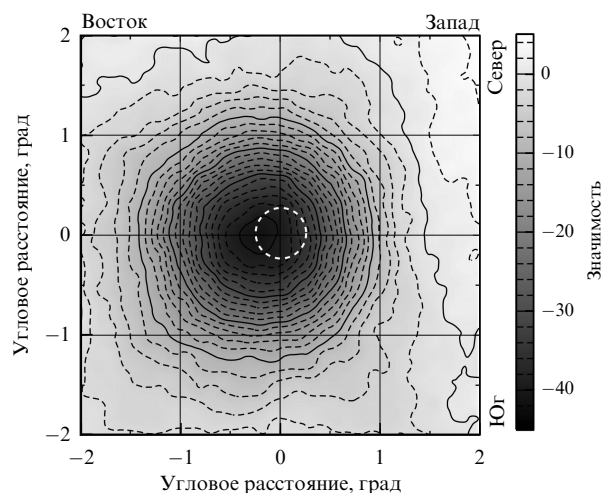


Рис. 56. Карта статистической значимости дефицита плотности событий, наблюдавшихся на установке Tibet-III. Начало координат указывает на центр диска Луны, границы диска отмечены белым пунктирным кругом. Шкала справа показывает уровень значимости дефицита плотности событий в единицах стандартного отклонения [227].

ном поле Земли. Высокое угловое разрешение Tibet-III делало его особенно чувствительным к небольшим смещениям тени, вызванным этим отклонением.

В ходе анализа данных, полученных за 1041 день набора данных в период с 1999 по 2004 гг., было отобрано  $1,5 \times 10^{10}$  событий с энергиями выше  $\sim 3 \text{ ТэВ}$ . На рисунке 56 показана измеренная лунная тень в виде карты статистической значимости дефицита плотности событий.

В центральной области карты уровень значимости дефицита событий достигает  $\sim 40\sigma$ . Центр тени смещён на  $0,23^\circ$  к западу от видимого центра Луны, что согласуется с ожидаемым отклонением протонов в геомагнитном поле. При этом не обнаружено признаков дополнительной тени к востоку от Луны, которая указывала бы на наличие антипротонов. На основе этих данных установлен верхний предел на отношение потоков антипротонов и протонов  $\bar{p}/p$ , равный 0,07 при доверительной вероятности 90 % для энергии несколько ТэВ.

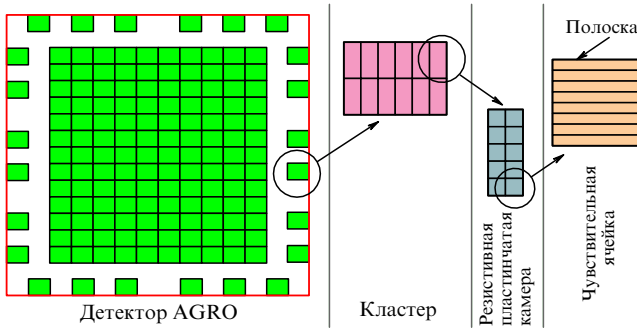


Рис. 57. Схема установки ARGO-YBJ: центральный массив из 130 кластеров и кольцо вокруг из 23 кластеров.

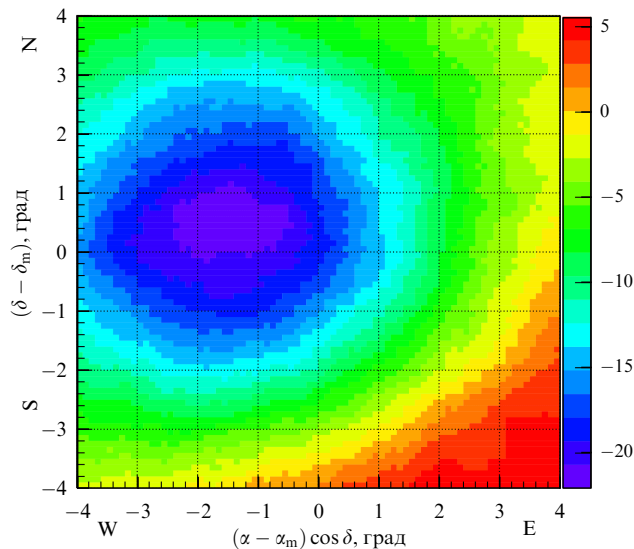


Рис. 58. Карта статистической значимости дефицита событий по данным ARGO-YBJ. По осям показаны прямое восхождение ( $\alpha$ ) и склонение ( $\delta$ ), отсчитываемые от положения Луны ( $\alpha_m, \delta_m$ ). Цветом показана статистическая значимость в единицах стандартных отклонений [228].

#### 4.6. ARGO-YBJ

Следующий шаг в изучении антипротонов при энергиях порядка ТэВ сделан в эксперименте ARGO-YBJ. В публикации 2012 г. коллаборация представила результаты измерения лунной тени и сделанной на основе этих измерений оценки отношения потоков  $\bar{p}/p$  [228].

Установка ARGO-YBJ (рис. 57) состоит из резистивных плоских камер, расположенных в форме центрального массива площадью  $74 \times 78 \text{ м}^2$  из 130 кластеров, окруженного кольцом из 23 кластеров, которое расширяет общую площадь установки до  $\sim 100 \times 110 \text{ м}^2$ . Плотное расположение детекторов обеспечивает угловое разрешение лучше, чем  $5^\circ$  для ШАЛ, инициированных частицами с энергией больше 5 ТэВ.

Для наблюдения лунной тени отобраны события, накопленные в период с июля 2006 г. по ноябрь 2009 г., инициированные протонами с медианной энергией  $\approx 750 \text{ ГэВ}$ , пришедшими из области неба размером  $10^\circ \times 10^\circ$ , в центре которой располагалась Луна. На рисунке 58 показана полученная карта статистической значимости дефицита событий.

Центр наблюдаемой тени, как и предполагалось, смещен относительно лунного диска, при этом основная её часть располагается по обе стороны от него, пере-

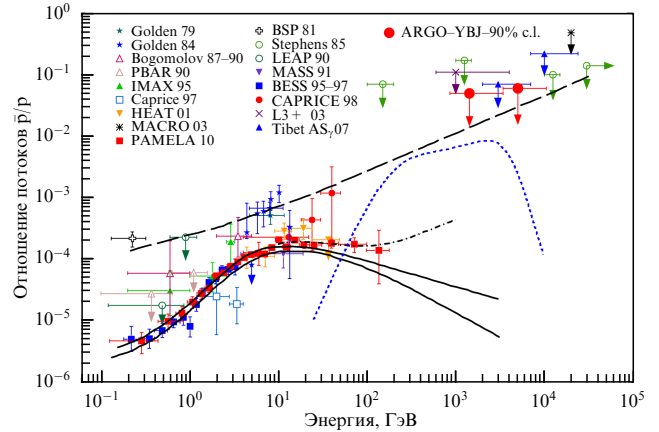


Рис. 59. Отношение потока антипротонов к потоку протонов, полученное в эксперименте ARGO-YBJ, в сравнении с другими доступными измерениями и теоретическими моделями [228].

крывая зону дефицита ожидаемых антипротонов. После расчётов не было обнаружено антипротонов высоких энергий в космических лучах и было установлено верхнее ограничение на отношение их потока к потоку протонов, равное 0,05 при медианной энергии 1,4 ТэВ и 0,06 при энергии 5 ТэВ с уровнем значимости 90%. На рисунке 59 приведено сравнение результатов эксперимента ARGO-YBJ по расчёту отношения  $\bar{p}/p$  с другими наземными и орбитальными наблюдениями. Помимо экспериментальных результатов на этом рисунке представлены теоретические расчёты вторичного образования антипротонов при распространении КЛ в Галактике (сплошные линии), модель внегалактического образования первичных антипротонов (пунктирная линия), модель аннигиляции тяжёлых частиц тёмной материи с рождением антипротонов (синяя пунктирная линия), модель образования антипротонов в старых остатках сверхновых и ускорения на источниках КЛ (штрихпунктирная линия).

#### 4.7. HAWC

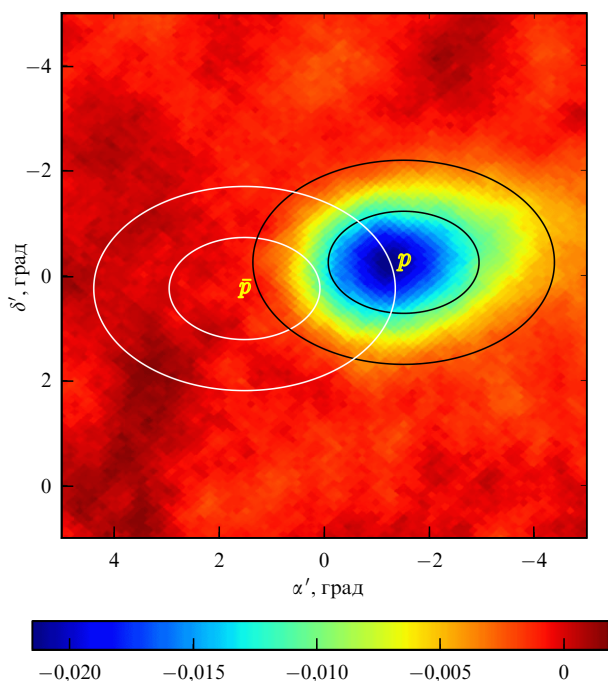
Наиболее строгие ограничения по содержанию антипротонов в космических лучах на сегодняшний день опубликовала в 2018 г. коллаборация HAWC по результатам измерений на одноимённой обсерватории [229]. Обсерватория состоит из 300 черенковских водных детекторов, расположенных на площади  $22000 \text{ м}^2$ .

В работе использовались данные, накопленные в период между ноябрём 2014 г. и августом 2017 г. Карта рассматриваемого участка неба, в котором ожидалась тень Луны, строилась в предположении об изотропном фоне космических лучей и тени в виде дефицита их потока. Ожидаемое угловое отклонение  $\delta\omega$  оценивалось по формуле:

$$\delta\omega \approx 1,6^\circ Z \left( \frac{E}{1 \text{ ТэВ}} \right)^{-1} \quad (1)$$

для частиц с зарядом  $Z$  и энергией  $E$ .

Тень в потоке протонов описывалась двумерным распределением Гаусса, параметры которого характеризуют её амплитуду, смещение, растяжение и размытость границ. Предполагалось, что тень в потоке антипротонов идентична тени в потоке протонов, но расположена симметрично относительно центра лунного диска и



**Рис. 60.** Тень Луны в потоке протонов с энергией 1,6 ТэВ. Чёрными эллипсами показаны уровни  $1\sigma$  и  $2\sigma$  распределения Гаусса, которым описывалась форма тени. Белый эллипс указывает на предполагаемое расположение тени антипротонов [229].

имеет меньшую амплитуду. На рисунке 60 показана карта дефицита потока космических лучей вместе с результатом фитирования суммой двух распределений Гаусса.

Применив эту методику ко всем энергетическим бинам в диапазоне 1–10 ТэВ, авторы получили верхние пределы на отношение потоков  $\bar{p}/p$ , показанные на рис. 61. Стоит отметить, что представленные верхние

пределы соответствуют уровню значимости 95 %, тогда как в более ранних работах заявленные пределы приведены для уровня значимости 90 %.

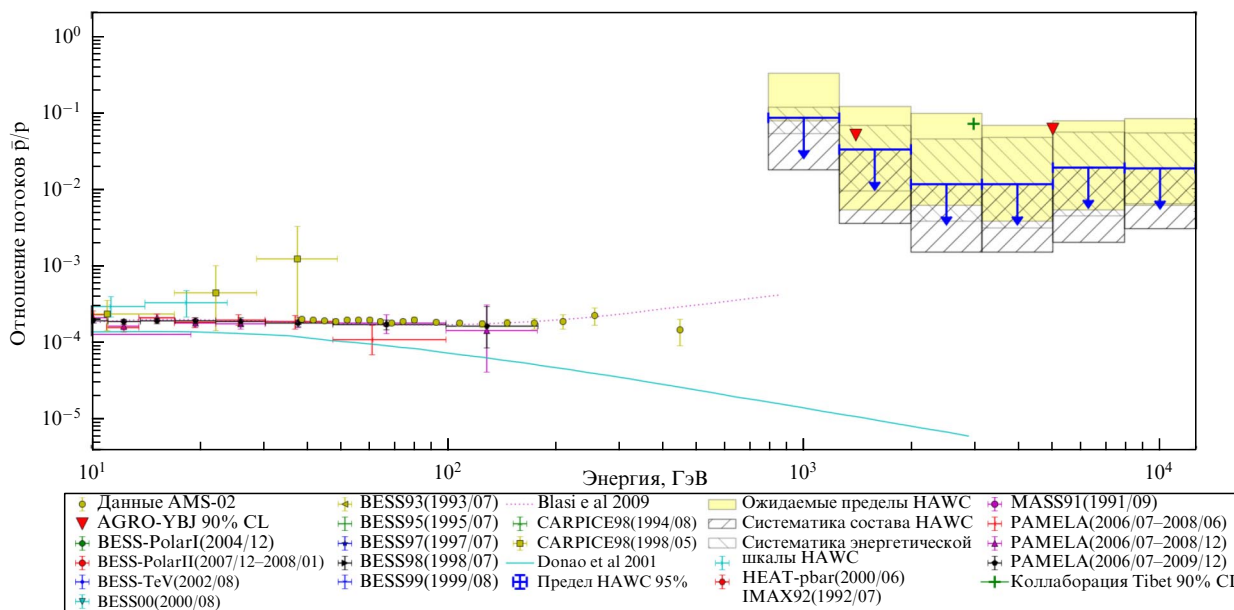
**4.8. Другие эксперименты**

Тень Луны наблюдалась в ряде других экспериментов, но поиск антипротонов космических лучей в них не проводился. Как правило, регистрация лунной тени использовалась для калибровки измерительной установки и определения её углового разрешения при различных энергиях.

Так, в эксперименте Soudan 2, целью которого являлось наблюдение распада протона, с помощью лунной тени удалось оценить угловое разрешение железного калориметра, регистрировавшего поток мюонов в шахте Саудан на глубине 2090 м водного эквивалента [230]. В 2004 г. начался похожий эксперимент MINOS, направленный на изучение нейтринных осцилляций. В эксперименте использовались два железных калориметра, один из которых располагался в той же шахте. В публикации 2011 г. коллаборация сообщила о наблюдении теней Луны и Солнца, что позволило измерить точность наведения на астрофизические объекты [231].

В 1997 г. начался набор данных в итальянском эксперименте CLUE. Измерительная установка представляла собой массив оптических телескопов, оптимизированный под регистрацию УФ-компоненты черенковского излучения от ШАЛ с использованием фотодетекторов, обладающих низкой чувствительностью к видимому свету. В задачи эксперимента входили проверка работоспособности такой методики измерений и непосредственное наблюдение тени Луны. В работе 2001 г. коллаборация опубликовала предварительные результаты наблюдения тени Луны [232].

Лунная тень наблюдалась в эксперименте IceCube на заключительном этапе строительства обсерватории в измерениях, накопленных в период с апреля 2008 г. по



**Рис. 61.** Отношение потока антипротонов к потоку протонов, полученное в эксперименте HAWC, вместе с более ранними измерениями. Жёлтая и заштрихованная полосы показывают чувствительность HAWC и систематическую неопределённость соответственно. Сплошной линией показана ожидаемая зависимость отношения  $\bar{p}/p$  от энергии в предположении вторичного происхождения антипротонов. Пунктирная линия соответствует первичному образованию антипротонов в сверхновых [229].

май 2010 г. [233]. Обсерватория состоит из оптических модулей, расположенных на вертикальных "струнах" в виде трёхмерного массива подо льдом на глубине 1450–2450 м, предназначенных для регистрации черенковского излучения от мюонов. Основная цель эксперимента состоит в регистрации астрофизических нейтрино высоких энергий, приходящих из северной половины небесной сферы, однако в возможности обсерватории входит также наблюдение космических лучей в диапазоне энергий от нескольких ТэВ до ПэВ. Лунная тень использовалась для независимой проверки правильности моделирования установки и техники реконструкции событий.

Глубоководный нейтринный телескоп ANTARES дополнил установку IceCube, обеспечив наблюдения высокоэнергетических нейтрино из южного полушария. Его устройство и принцип работы в общих чертах повторяют установку IceCube, что означает также возможность наблюдения мюонов от ШАЛ, инициированных космическими лучами. В 2018 г. коллаборация ANTARES опубликовала результаты наблюдения лунной тени в потоке космических лучей по наблюдениям с 2007 по 2016 г. [234].

Наконец, тень Луны в космических лучах наблюдалась на современных наземных гамма-обсерваториях и использовалась для калибровки установки и определения углового разрешения. В 2015 г. о результатах таких наблюдений сообщила коллаборация VERITAS [235], а в 2021 и 2023 гг. — коллаборация LHAASO [236–239].

## 5. Антиядра с $A > 1$

Антигелий-3 был впервые обнаружен в 1970 г. на ускорителе ИФВЭ [240, 241], а антигелий-4 был получен в 2011 г. на ускорителе в Брукхейвене [242]. Благодаря этому удалось доказать, что антиядра с  $A > 1$  тоже способны образовываться в результате неупругих столкновений частиц материи, как позитроны и антипротоны.

Сегодня не вызывает сомнений, что обнаружение антиядер в космических лучах представляет собой одну из важнейших задач, связанных с астрофизикой и космологией. Эти античастицы могут генерироваться в классических процессах только с крайне малой вероятностью, в результате чего их потоки, обусловленные вторичным происхождением, должны быть на порядки меньше потоков уже обнаруженных сегодня античастиц [17, 38, 243]. Так, согласно расчётам [52, 244–248], потоки вторичных антигелия-3 и антигелия-4 должны оказаться на несколько порядков ниже чувствительности самого большого прецизионного прибора из ныне существующих — AMS-02. Обнаружение антиядер выше расчётных значений, соответствующих вторичному образованию, означало бы наличие их дополнительных источников [244, 249, 250]. Наиболее часто в этих случаях рассматриваются процессы, связанные со свойствами гипотетических частиц тёмной материи [251, 252] или с чёрными дырами [253]. Сравнительно невысокие энергии образующихся частиц можно заметно повысить, например, благодаря повторному ускорению Ферми с помощью магнитогидродинамических волн в межзвёздной среде [251, 254].

Тем не менее согласовать обсуждаемые ниже результаты измерений с теоретическими расчётами во многих случаях оказывается весьма сложно, так как требуется одновременное объяснение потоков различных компо-

нент космических лучей. В связи с этим часто встречаются другие гипотезы, прибегающие к различным реализациям эволюции вещества в ранней Вселенной, что способно привести к неоднородностям генерации избытка вещества или антивещества на разных масштабах, а это, в свою очередь, может вылиться в формирование в наше время небольших доменов антивещества, представляющих собой отдельные антизвёзды или их скопления. В связи с этим такие результаты имеют фундаментальное значение ещё и для космологии, предоставив новые сведения для изучения структуры и эволюции Вселенной [255–260].

Первоначальные попытки обнаружить антиядра и оценить их потоки были предприняты ещё в 1975 г., когда в рамках экспериментов с использованием баллонных спектрометров были получены первые ограничения на поток ядер антигелия [261]. Эти эксперименты, несмотря на свои технические ограничения, стали важным шагом в поисках антиматерии в космическом пространстве, заложив основы для последующих исследований.

### 5.1. Антигелий

Первые измерения, в которых было получено ограничение на поток ядер антигелия, проведены в 1975 г. с использованием спектрометров со сверхпроводящими магнитами, установленными на высотных аэростатах [261].

Значительного продвижения удалось добиться только спустя два десятилетия с началом полётов спектрометра BESS [151, 262, 263]. За первые семь полётов (1993–2000 гг.) было зарегистрировано  $6,6 \times 10^6$  ядер гелия в диапазоне жёсткостей 1–14 ГВ, при этом не обнаружено ни одного кандидата в антигелий. Полученный верхний предел отношения потоков антигелия и гелия составил  $6,8 \times 10^{-7}$  с уровнем достоверности 95 % в предположении, что антигелий и гелий будут иметь одинаковый спектр [264].

Позднее в эксперименте BESS-Polar I зарегистрировано  $8,1 \times 10^6$  ядер гелия в диапазоне жёсткостей от 1 до 20 ГВ, но также ни одного кандидата в ядра антигелия в этой выборке событий не обнаружено. Полученный верхний предел отношения потоков ядер антигелия и гелия составил  $4,4 \times 10^{-7}$ , а по результатам анализа совокупности данных экспериментов BESS до BESS-Polar I включительно установлен верхний предел  $2,7 \times 10^{-7}$  в диапазоне жёсткостей от 1 до 14 ГВ [157, 165]. Количество зарегистрированных ядер гелия в том же диапазоне жёсткостей было увеличено до  $4 \times 10^7$  в усовершенствованном эксперименте BESS-Polar II, но это не позволило обнаружить ни одного события-кандидата в антигелий [164]. Аналогично предыдущим расчётам эксперимента BESS был проведён анализ данных, зарегистрированных во всех полётах, включая оба полёта BESS-Polar, по результатам которого получен наиболее строгий предел  $6,9 \times 10^{-8}$  (с уровнем достоверности 95 %) в предположении, что ядра антигелия и гелия имеют одинаковый спектр [160, 165]. Предел на соотношение потоков He/He, полученный в предположении, что спектры ядер гелия и антигелия могут отличаться, составил  $1,0 \times 10^{-7}$  в том же диапазоне жёсткостей с таким же уровнем достоверности [160, 265]. На рисунке 62 показаны актуальные на момент публикации данные эксперимента BESS-Polar II пределы отношения потоков антигелия и гелия в космических лучах [160].

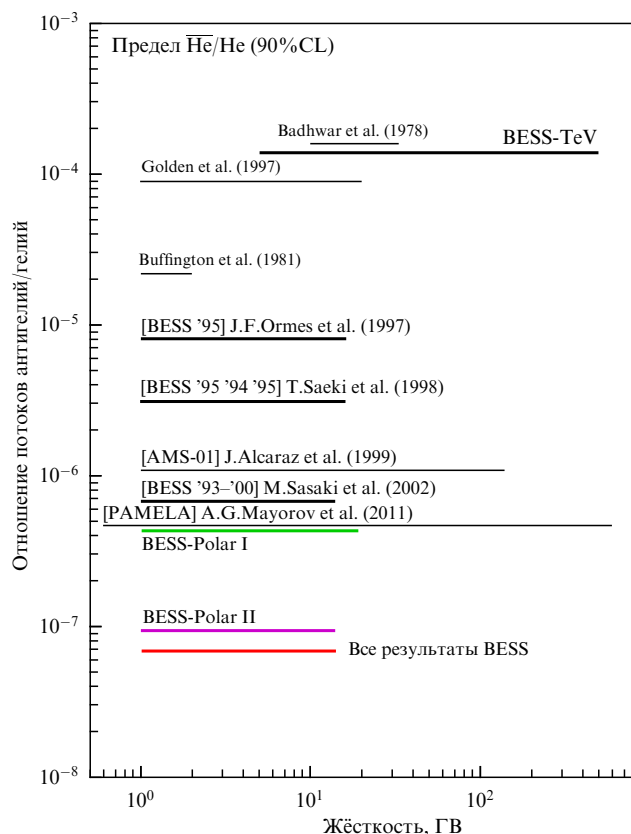


Рис. 62. Верхний предел отношения потоков антигелия и гелия по данным серии экспериментов BESS, рассчитанный в предположении одинаковой формы их энергетических спектров, в сравнении с результатами более ранних экспериментов [17, 266–270]. Предел в отсутствие этого предположения примерно на 25 % выше [265].

Таким образом, эксперименты BESS-Polar позволили существенно ужесточить верхний предел на отношение потоков антигелия и гелия: более чем на два порядка по сравнению с первым результатом BESS [262, 263] и более чем на три порядка по сравнению с ранними измерениями [17, 266, 267]. Логическим продолжением этих исследований стали космические эксперименты PAMELA и AMS-02, проводящиеся за пределами стратосферы и свободные от фона, связанного с рождением частиц в остаточной атмосфере.

После проведенного анализа данных эксперимента PAMELA, собранных за период с июня 2006 г. по декабрь 2009 г., в интервале жесткостей от 0,6 ГВ до 600 ГВ было отобрано около  $6 \times 10^6$  событий с зарядом  $|Z| = 2$ , все они имели кривизну трека, соответствующую событиям с положительной жесткостью. Событий с зарядом  $Z = -2$ , которые могли бы быть интерпретированы как ядра антигелия, обнаружено не было. На основе этих данных вычислен верхний предел на отношение потоков ядер  $\overline{\text{He}}/\text{He}$ , равный  $4,7 \times 10^{-7}$  с 95 % доверительной вероятностью при предположении одинаковой формы спектров гелия и антигелия [269]. При жесткостях выше 14 ГВ этот предел является самым низким среди всех проведенных к тому времени экспериментов (см. рис. 62).

Поиск антигелия является одним из приоритетных направлений работы магнитного спектрометра AMS-02, по итогам первых пяти лет работы (2011–2016 гг.) которого были выделены несколько событий с зарядом  $Z = -2$ , чьи восстановленные массы соответствуют яд-

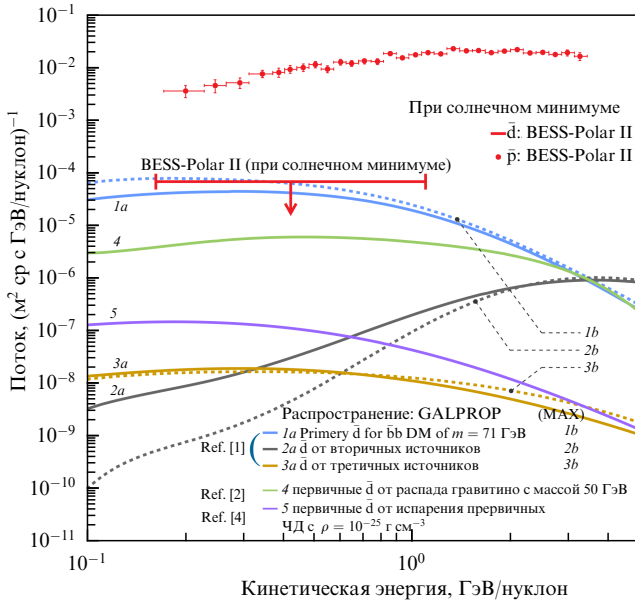
рам  ${}^3\overline{\text{He}}$ . Частота регистрации таких событий составила порядка одного кандидата в год, при этом для окончательного подтверждения их природы требуется подавление фона, которым являются ядра  ${}^3\text{He}$ , на уровне  $10^{-9}$  [271]. В 2016 г. на конференции, посвященной обзору результатов эксперимента AMS-02, показаны порядка десяти событий, имеющих заряды и массы, соответствующие ядрам антигелия [13]. В последующих докладах, представленных в 2018 г. на конференции "AMS Days at La Palma", сообщалось о продолжении анализа и о выделении кандидатов антиядер гелия  ${}^3\overline{\text{He}}$  и  ${}^4\overline{\text{He}}$ . На недавнем семинаре ЦЕРН (Detector Seminar, 9 мая 2025 г.) в презентации Коррадо Гаргульо [272] отмечено, что AMS-02 к настоящему времени зарегистрировал свыше  $2,4 \times 10^{11}$  событий, что расширило возможности для выделения античастиц. В частности, по-прежнему сообщалось о десяти событиях-кандидатах в антигелий, восемь из которых — это  ${}^3\overline{\text{He}}$ , а два —  ${}^4\overline{\text{He}}$ . Несмотря на значительный интерес, реферируемых публикаций с финальной статистикой по обоим изотопам пока нет; работа по анализу данных AMS-02 продолжается [272–274].

Даже единичное достоверное событие антигелия-3 стало бы серьезным вызовом стандартным моделям вторичного происхождения, поскольку ожидаемые потоки от этого источника лежат на 1–2 порядка ниже чувствительности AMS-02 [184]. Современные теоретические модели показывают, что включение в сценарий аннигиляции темной материи каналов с тяжелыми барионами (например,  $\Lambda_b$ ) способно существенно повысить вероятность связывания антинуклонов в антигелий, сохраняя согласие с ограничениями по антипротонам [243, 252]. Альтернативой сценариям с темной материей являются гипотезы о существовании долгоживущих областей антивещества в Галактике — так называемых антиоблаков или антизвезд. В недавних обзорах отмечено, что такие объекты могут продуцировать тяжелые антиядра при взаимодействии с межзвездным веществом, увеличивая ожидаемый поток изотопов антигелия-3 и антигелия-4 на порядок и более [257]. При этом долгоживущие антидоменные структуры должны обладать крайне малой скоростью смешивания с обычным веществом, чтобы избежать жестких ограничений по космическому гамма-излучению и микроволновому фоновому излучению. Подтвержденное обнаружение хотя бы одного ядра антигелия-4 стало бы особенно трудным для объяснения в рамках большинства существующих моделей и потребовало бы обращения к экзотическим источникам или новым каналам формирования тяжелой антиматерии [243, 248, 275].

## 5.2. Антидейтроны

Поиск антидейтронов в космических лучах представляет собой одну из наиболее перспективных задач, поскольку их ожидаемые потоки при стандартных астрофизических механизмах вторичного происхождения чрезвычайно малы [51, 276]. Это делает антидейтроны особенно чувствительным зондом для поиска нестандартных источников — в первую очередь аннигиляции или распада частиц темной материи, а также процессов, связанных с первичными черными дырами.

Первые поиски антидейтронов в экспериментах BESS проводились по совокупности данных, полученных в результате четырех полетов высотных аэростатов с 1997 по 2000 гг., однако ни одного кандидата зарегистрировано не было [170, 277]. Тем не менее был установлен

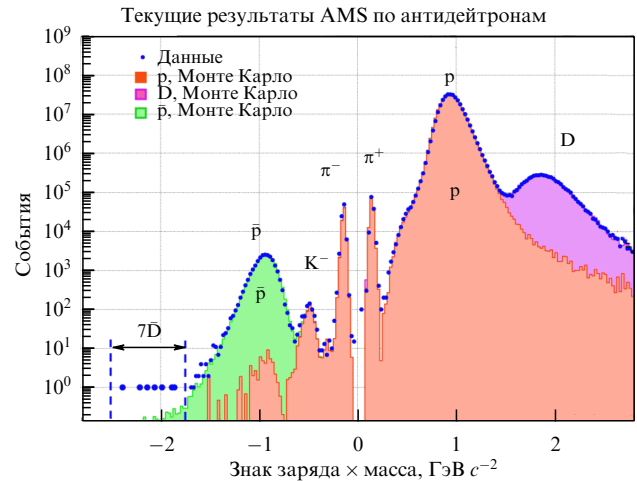


**Рис. 63.** Верхний предел потока антинейтронов по данным BESS-Polar II в минимуме солнечной активности в 2007–2008 гг., красными точками для сравнения показан поток антипротонов за тот же период времени. Сплошные кривые (1a, 2a, 3a) и пунктирные кривые (1b, 2b, 3b), рассчитанные с различными наборами параметров распространения, показаны для первичных  $\bar{d}$ , полученных в результате аннигиляции частиц ТМ в пару  $b\bar{b}$ , а также для вторичных и третичных вкладов соответственно. Сплошные кривые (4, 5), рассчитанные с одним набором параметров распространения, представлены для теоретически возможных источников первичных  $\bar{d}$ , таких как гравитино [279] и ПЧД [281].

верхний предел с уровнем достоверности 95 % для дифференциального потока антинейтронов космических лучей в энергетическом диапазоне 0,17–1,15 ГэВ/нуклон в верхней части атмосферы, равный  $1,9 \times 10^{-4}$  ( $\text{м}^2 \text{ с ср ГэВ/нуклон}$ ) $^{-1}$ .

Анализ данных BESS-Polar II, полученных в 2007–2008 гг. в условиях минимума солнечной активности, позволил существенно улучшить это ограничение. В результате обработки  $4,7 \times 10^9$  событий космических лучей ни одного кандидата  $\bar{d}$  найдено не было, и установлен новый верхний предел потока  $\bar{d}$ , который составил  $6,7 \times 10^{-5}$  ( $\text{м}^2 \text{ с ср ГэВ/нуклон}$ ) $^{-1}$  при доверительной вероятности 95 % в диапазоне энергий от 0,163 до 1,100 ГэВ/нуклон [278]. Этот предел представлен на рис. 63 в сравнении с возможными потоками антинейтронов в минимуме солнечной активности, полученными из теоретических расчётов [279–281].

Современный результат BESS-Polar II более чем в 14 раз превосходит предел BESS97 и впервые достигает чувствительности, достаточной для ограничения ряда современных теоретических моделей. В частности, предсказания потоков  $\bar{d}$  от аннигиляции тёмной материи в канале  $b\bar{b}$  с массой  $\sim 70$  ГэВ, распада гравитино с массой  $\sim 50$  ГэВ, а также испарения первичных чёрных дыр с локальной плотностью в окрестности Солнечной системы  $10^{-32}$  г  $\text{см}^{-3}$  оказываются сопоставимыми или частично исключаются результатами BESS-Polar II [51, 279–281]. Важным обстоятельством является то, что астрофизический фон вторичных антинейтронов, образующихся во взаимодействиях космических лучей с межзвёздным газом, на низких энергиях ( $< 1$  ГэВ/нуклон) на



**Рис. 64.** События-кандидаты в антинейтроны, представленные коллаборацией AMS-02 в июне 2023 г. на семинаре в ЦЕРН [284].

несколько порядков ниже, чем возможный сигнал от нестандартных источников [282]. Это делает дальнейшие поиски  $\bar{d}$  особенно перспективными.

В 2016 г. на конференции, посвящённой обзору результатов AMS-02, сообщили о предварительном выделении нескольких кандидатов в антинейтроны, однако до сих пор эти данные остаются без рецензируемых публикаций [13]. Дальнейшее обсуждение перспектив наблюдения антинейтронов и их возможных источников проводилось на конференции "2nd Cosmic-ray Antideuteron Workshop" в UCLA [283]. Позднее эти события-кандидаты были представлены коллаборацией AMS-02 на семинаре в ЦЕРН в июне 2023 г. [284].

### 5.3. Будущие эксперименты

Эксперимент AMS-02 получит своё развитие в спектрометре нового поколения AMS-100 (см. раздел 3.1.7), приоритетной задачей которого будет регистрация тяжёлых антиядер  $A > 1$ . Согласно расчётам, показанным в статье [205], AMS-100 будет способен регистрировать порядка 1000 антинейтронов за десять лет (рис. 66).

Более того, если экстраполировать частоту регистрации событий антигелия экспериментом AMS-02 и учесть геометрический фактор AMS-100, то это даст темп счёта порядка 1000 событий ядер антигелия в год, что позволит произвести точное измерение формы спектра ядер антигелия [205]. Таким образом, разрешение AMS-100 будет достаточно высоким, чтобы различать источники ядер антигелия (рис. 65).

Особые надежды по повышению чувствительности к антинейтронам возлагаются на эксперимент GAPS (рис. 66), первый запуск которого в виде стратосферного полёта (GAPS balloon) ожидается в ближайшие годы, а спутниковая версия (GAPS SAT) рассматривается как долгосрочная перспектива [282, 286].

Методика GAPS основана на регистрации каскадов рентгеновского и гамма-излучения при образовании экзотических атомов антиматерии в газовой мишени. Такая техника особенно эффективна для антинейтронов низких энергий, где фоновые процессы минимальны. Согласно расчётам, именно антинейтроны считаются надёжным сигналом от частиц тёмной материи, поскольку их вторичный астрофизический фон чрезвычайно мал [282].

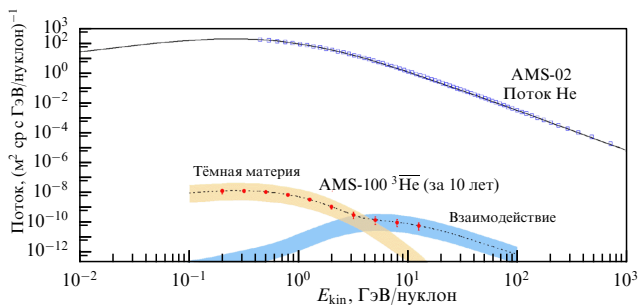


Рис. 65. Предсказание потока ядер антигелия-3 по данным AMS-100. Для сравнения представлен поток гелия по данным AMS-02 [285].

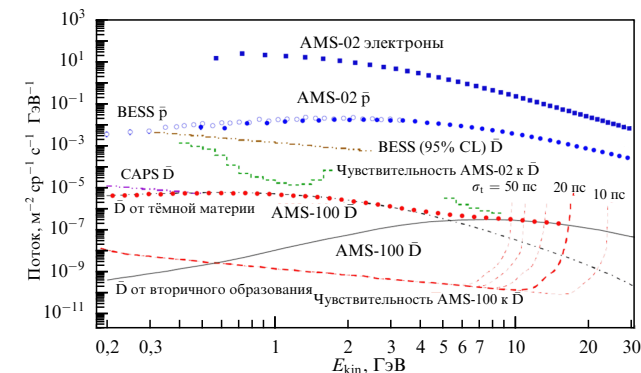


Рис. 66. Сравнение чувствительности современных (AMS-02 и BESS) и проектируемых детекторов (AMS-100 и GAPS) к античастицам с  $Z = -1$  [285].

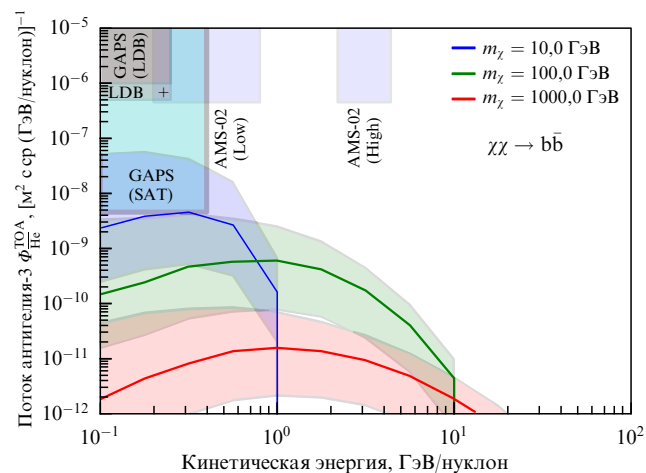


Рис. 67. Поток антигелия-3, приходящий на верхнюю границу атмосферы, для разных сценариев аннигиляции тёмной материи [52].

Разрабатываемый детектор эксперимента GAPS SAT потенциально может быть чувствительным к WIMP [286], аннигилирующим в  $W^+W^-$  и  $b\bar{b}$  [52]. На рисунке 67 показан поток антигелия-3, приходящий на верхнюю границу атмосферы для разных сценариев аннигиляции тёмной материи ( $W^+W^-$  и  $b\bar{b}$ ) при различных массах частиц тёмной материи. Графики показывают, что при оптимистических сценариях в эксперименте GAPS SAT могут быть зарегистрированы сигналы от аннигиляции частиц тёмной материи, если её масса не более 10 ГэВ, однако более высокие массы быстро становятся недоступными для наблюдения, особенно в случае  $W^+W^-$ .

Существуют и более экзотические способы обнаружения антиядер космических лучей. Так, в статье [222], о

которой шла речь выше, было выдвинуто предположение, что античастицы с  $A > 1$  возможно наблюдать с помощью метода тени Луны. Было сделано предположение, что тень от антигелия могла бы наблюдаться дальше тени антипротонов, с возможным перекрытием. Однако точных расчётов, как для антипротонов, приведено не было. На данный момент нет статей, которые бы использовали данный метод на наблюдательных данных. Лишь в статье 2007 г. было упомянуто, что при наблюдении тени Луны нет никаких свидетельств присутствия частиц с отрицательным зарядом, таких как  $\bar{p}$ ,  $\bar{d}$ , ...,  $\bar{Fe}$ , ..., если таковые имеются. Таким образом, пока метод не будет усовершенствован для поиска антипротонов, нет возможности применять его для поиска прочих античастиц.

### 6. Заключение

Регистрация и наблюдения античастиц, в частности антипротонов, являются перспективным направлением для изучения устройства Вселенной на всех масштабах: начиная от теории взаимодействия частиц разных энергий, распространения заряженных частиц в окружающей среде, так и исследование устройства Вселенной (барионная асимметрия), существование альтернативных источников античастиц, исследование тёмной материи. Наблюдаемый избыток потоков античастиц может быть связан с неучтёнными источниками античастиц: астрофизическими источниками, распадом и/или аннигиляцией экзотических частиц за пределами стандартной модели или с нашим неверным предположением о составе межзвёздной среды и различиями в сечениях взаимодействия.

Таким образом, обзор проведённых исследований антипротонов и более тяжёлых антиядер в космических лучах демонстрирует важную роль, которую эти частицы играют в изучении фундаментальных процессов Вселенной. Антипротоны, наряду с другими частицами антиматерии (позитронами и антиядрами), представляют собой уникальные частицы, позволяющие исследовать механизмы генерации и распространения космических лучей в Галактике. Понимание их происхождения и характеристик даёт возможность изучать не только процессы, происходящие в астрофизических источниках, таких как сверхновые звёзды и остатки их взрывов, но и явления более экзотической природы, включая аннигиляцию частиц тёмной материи и испарение первичных чёрных дыр.

Перспективы исследований тяжёлых антиядер, таких как антигелий, также остаются открытыми. Обнаружение таких частиц, даже в единичных событиях, могло бы изменить наше представление о происхождении антиматерии и указать на существование областей антивещества или космологических процессов, отличных от стандартной модели.

Точные измерения спектра антипротонов в широком диапазоне энергий позволяют ограничить параметры моделей тёмной материи и дают ценные сведения о процессах взаимодействия космических частиц с межзвёздным веществом. Несмотря на успехи последних лет, остаются открытые вопросы, требующие дальнейших экспериментов, особенно в области высоких энергий и в исследованиях более тяжёлых антиядер, таких как антигелий. Это создаёт предпосылки для проведения новых миссий и разработок более чувствительных детекторов.

**Благодарности.** Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда 25-22-00508, <https://rscf.ru/project/25-22-00508/>.

## Список литературы

- Xu Q, Brown L M *Am. J. Phys.* **55** 23 (1987)
- Millikan R A, Cameron G H *Nature* **121** 19 (1928)
- Skobelzyn D Z. *Phys.* **43** 354 (1927)
- Skobelzyn D Z. *Phys.* **54** 686 (1929)
- Скобельцын Д В *УФН* **93** 331 (1967)
- Лидванский А С *УФН* **194** 999 (2024); Lidvansky A S *Phys. Usp.* **67** 943 (2024)
- Гинзбург В Л *УФН* **74** 521 (1961); Ginzburg V L *Sov. Phys. Usp.* **4** 553 (1962)
- Гинзбург В Л, Птускин В С *УФН* **117** 585 (1975); Ginzburg V L, Ptuskin V S *Sov. Phys. Usp.* **18** 931 (1975)
- Гинзбург В Л *УФН* **166** 169 (1996); Ginzburg V L *Phys. Usp.* **39** 155 (1996)
- Anderson C D *Phys. Rev.* **43** 491 (1933)
- Bogomolov E A et al., in *16th Intern. Cosmic Ray Conf. Vol. 1* (S Miyake) (Tokyo: Institute for Cosmic Ray Research, Univ. of Tokyo, 1979) p. 330
- Golden R L et al. *Phys. Rev. Lett.* **43** 1196 (1979)
- Ting S "The First Five Years of the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station:Unlocking the Secrets of the Cosmos", December 8, 2016 (Rome: National Institute for Nuclear Physics, Italy, 2016)
- Adriani O et al. *Phys. Rev. Lett.* **102** 051101 (2009)
- Aguilar M et al. *Phys. Rev. Lett.* **117** 091103 (2016)
- Adriani O et al. *Phys. Rev. Lett.* **111** 081102 (2013)
- Buffington A, Schindler S M, Pennypacker C R *Astrophys. J.* **248** 1179 (1981)
- Salamon M H et al. *Astrophys. J.* **349** 78 (1990)
- Streitmatter E R et al., in *Proc. of the 21st Intern. Cosmic Ray Conf., 6–19 January 1990, Adelaide, Australia* Vol. 3 (1990) p. 277, OG Sessions
- Moats A et al., in *Proc. of the 21st Intern. Cosmic Ray Conf., 6–19 January 1990, Adelaide, Australia* Vol. 3 (1990) p. 284, OG Sessions
- Buffington A et al. *Nature* **236** 335 (1972)
- Evoli C, Gaggero D, Grasso D J. *Cosmol. Astropart. Phys.* **2015** (12) 039 (2015)
- Kappl R, Winkler M W J. *Cosmol. Astropart. Phys.* **2014** (09) 051 (2014)
- Giesen G et al. *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **2015** (09) 023 (2015)
- Kappl R, Reinert A, Winkler M W J. *Cosmol. Astropart. Phys.* **2015** (10) 034 (2015)
- Donato F et al. *Astrophys. J.* **563** 172 (2001)
- Gaïsser T K, Schaefer R K. *Astrophys. J.* **394** 174 (1992)
- Yoshimura K et al. *Phys. Rev. Lett.* **75** 3792 (1995)
- Moiseev A et al. *Astrophys. J.* **474** 479 (1997)
- Moskalenko I V et al. *Astrophys. J.* **565** 280 (2002)
- Cirelli M et al. *Nucl. Phys. B* **813** 1 (2009)
- Young S, Byrnes Ch T J. *Cosmol. Astropart. Phys.* **2015** (04) 034 (2015)
- Alfvén H *Rev. Mod. Phys.* **37** 652 (1965)
- Mertsch P, Sarkar S *Phys. Rev. D* **90** 061301 (2014)
- Barrau A et al. *Astron. Astrophys.* **388** 676 (2002)
- Donato F et al. *Phys. Rev. D* **69** 063501 (2004)
- Donato F et al. *Phys. Rev. Lett.* **102** 071301 (2009)
- Strong A W, Moskalenko I V, Ptuskin V S *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **57** 285 (2007)
- Silk J, Srednicki M *Phys. Rev. Lett.* **53** 624 (1984)
- Orito S, Mitsui T, Maki K *Phys. Lett. B* **318** 169 (1996)
- Ellis J et al. *Phys. Lett. B* **214** 403 (1988)
- Bottino A et al. *Phys. Rev. D* **58** 123503 (1998)
- Potgieter M S, Burger R A *Astron. Astrophys.* **233** 598 (1990)
- Aslam O P M et al. *Astrophys. J.* **953** 101 (2023)
- Aguilar M et al. (AMS Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **134** 051002 (2025)
- Adriani O et al. *Astrophys. J. Lett.* **737** L29 (2011)
- Pugacheva G et al. *Astropart. Phys.* **20** 257 (2003)
- Gusev A A et al. *Geophys. Res. Lett.* **30** 1161 (2003)
- Selesnick R S et al. *Geophys. Res. Lett.* **34** L20104 (2007)
- Jayanthi U B, Gusev A A *Adv. Astron.* **2011** 471094 (2011)
- Donato F, Fornengo N, Salati P *Phys. Rev. D* **62** 043003 (2000)
- Carlson E et al. *Phys. Rev. D* **89** 076005 (2014)
- Dirac P A M *Proc. R. Soc. London A* **117** 610 (1928)
- Dirac P A M *Proc. R. Soc. London A* **133** 60 (1931)
- Chamberlain O et al. *Phys. Rev.* **100** 947 (1955)
- Chamberlain O et al. *Phys. Rev.* **101** 909 (1956)
- Chamberlain O et al. *Nuovo Cimento* **3** 447 (1956)
- Cork B et al. *Phys. Rev.* **104** 1193 (1956)
- Massam T et al. *Nuovo Cimento A* **63** 10 (1965)
- Dorfan D E et al. *Phys. Rev. Lett.* **14** 1003 (1965)
- Camilleri L *Phys. Rep.* **144** 51 (1987)
- Bizzarri U et al. *Nuovo Cimento A* **73** 42 (1983)
- van der Meer S "Stochastic damping of betatron oscillations in the ISR", CERN/ISR-PO/72-31 (Geneva: CERN, 1972); <https://cds.cern.ch/record/312939>
- Bregman M et al. *Phys. Lett. B* **78** 174 (1978)
- Адо Ю М *УФН* **145** 87 (1985); Ado Yu M *Sov. Phys. Usp.* **28** 54 (1985)
- Arnison G et al. (UA1 Collab.) *Phys. Lett. B* **122** 103 (1983)
- Arnison G et al. (UA1 Collab.) *Phys. Lett. B* **126** 398 (1983)
- Bellone R et al. "The design and prototype tests of the CERN antiproton production target", CERN-SPS-80-9-ABT (Geneva: CERN, 1980)
- Jones E et al. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **30** 2778 (1983)
- ван дер Меер С *УФН* **147** 405 (1985); Van der Meer S "Stochastic cooling and accumulation of antiprotons", Nobel Lecture. Stockholm, 11 December, 1984
- Eades J, Hartmann F J *Rev. Mod. Phys.* **71** 373 (1999)
- Batty C J *Nucl. Phys. A* **601** 425 (1996)
- Batty C J *Rep. Prog. Phys.* **52** 1165 (1989)
- Baur G et al. *Phys. Lett. B* **368** 251 (1996)
- Charman A E (The ALPHA Collab.) *Nature Commun.* **4** 1785 (2013)
- Amole C et al. *Nature* **483** 439 (2012)
- Amole C et al. *Phys. Plasmas* **20** 043510 (2013)
- Ahmadi M et al. *Nature* **541** 506 (2017)
- Anderson D L, Sher M, Turan I *Phys. Rev. D* **70** 016001 (2004)
- Ulmer S et al. *Nature* **524** 196 (2015)
- Jentschura U D *Symmetry* **13** 1192 (2021)
- Сахаров А Д *Письма в ЖЭТФ* **5** 32 (1967); Sakharov A D *JETP Lett.* **5** 24 (1967)
- Peoples J *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **30** 1970 (1983)
- Mills F E *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **271** 176 (1988)
- Abe F et al. (CDF Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **74** 2626 (1995)
- Abachi S et al. (D0 Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **74** 2632 (1995)
- Abe F et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **271** 387 (1988)
- Bross A D (for the DØ Collab.) *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **44** 12 (1995)
- Aaltonen T et al. (CDF Collab.) *Phys. Rev. D* **85** 072002 (2012)
- Blanford G et al. *Phys. Rev. Lett.* **80** 3037 (1998)
- Aumann T et al. *Eur. Phys. J. A* **58** 88 (2022)
- Hansen P G, Jonson B, Jensen A S *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **45** 591 (1995); CTHSP-95-08 (Gothenburg: Chalmers Univ. of Technology, Department of Physics, 1995)
- Kienle P *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **214** 191 (2004)
- Brown B A et al. *Phys. Rev. C* **76** 034305 (2007)
- Trzcíńska A et al. *Phys. Rev. Lett.* **87** 082501 (2001)
- Tanihata I et al. *Phys. Rev. Lett.* **55** 2676 (1985)
- Hansen P G, Jonson B *Europhys. Lett.* **4** 409 (1987)
- Cohen J S *Phys. Rev. A* **69** 022501 (2004)
- The ALPHA Collab., Charman A E *Nature Commun.* **4** 1785 (2013)
- Anderson E K et al. *Nature* **621** 716 (2023)
- Maury S *Hyperfine Interactions* **109** 43 (1997)
- Hori M, Walz J *Prog. Part. Nucl. Phys.* **72** 206 (2013)
- Bartmann W et al. *Philos. Trans. R. Soc. A* **376** 20170266 (2018)
- Bertsche W A. *Philos. Trans. R. Soc. A* **376** 20170265 (2018)
- Villata M *Ann. Physik* **536** 2300519 (2024)
- Andresen G B et al. (ALPHA Collab.) *Nature Phys.* **7** 558 (2011)
- Kuroda N et al. *Nature Commun.* **5** 3089 (2014)
- Gibney E *Nature* **554** 412 (2018)
- Holzschneider M H et al. *Radiotherapy Oncology* **81** 233 (2006)
- Sellner S et al. *Hyperfine Interactions* **213** 159 (2012)
- Stegeby H *Cancer Rep.* **1** e1128 (2018)
- Van Allen J A, Gangnes A V *Phys. Rev.* **79** 51 (1950)
- Фрадкин М И *ЖЭТФ* **29** 147 (1955); Fradkin M I *Sov. Phys. JETP* **2** 87 (1956)
- Steigman G *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **14** 339 (1976)
- Aizu H et al. *Phys. Rev.* **121** 1206 (1961)
- Grigorov N L et al. *Planet. Space Sci.* **9** 875 (1962)
- Григоров Н Л и др. *ЖЭТФ* **45** 394 (1963); Grigorov N L et al. *Sov. Phys. JETP* **18** 272 (1964)
- Apparao M V K *Nature* **215** 727 (1967)

119. Powell C F, Fowler P H, Perkins D H *The Study of Elementary Particles by the Photographic Method: An Account of the Principal Techniques and Discoveries, Illustrated by an Atlas of Photomicrographs* (New York: Pergamon Press, 1959)
120. Григоров Н Л и др., в сб. *Искусственные спутники Земли* Вып. 10 (М.: Изд-во АН СССР, 1961) с. 96
121. Babayan Kh P et al., in *High Energy Interactions, Proc. from the 8th Intern. Cosmic Ray Conf.* Vol. 5 (1963) p. 51
122. Иванова Н С, Гагарин Ю Ф, Куликов В Н *Космические исследования* 6 83 (1968); Ivanova N S, Gagarin Yu F, Kulikov V N *Cosmic Res.* 6 69 (1968)
123. Stephens S A, Golden R L *Space Sci. Rev.* 46 31 (1988)
124. Chamberlain O et al. *Phys. Rev.* 113 1615 (1959)
125. Arraago M V K *Can. J. Phys.* 46 S654 (1968)
126. Greenhill J G, Clarke A R, Elliot H *Nature* 230 170 (1971)
127. Bogomolov E A et al., in *Intern. Cosmic Ray Conf., 17th, Paris, France, July 13–25, 1981, Conf. Papers* Vol. 9 (Gif-sur-Yvette: Commissariat a l'Energie Atomique, 1981) p. 146
128. Богомолов Э А и др. *ЖТФ* 69 (9) 99 (1999); Bogomolov E A et al. *Tech. Phys.* 44 1089 (1999)
129. Bogomolov E A et al., in *Proc. of the 16th Intern. Cosmic Ray Conf.* Vol. 1 (Ed. S Miyake) (Tokyo: Intern. Union of Pure and Applied Physics, 1979) p. 330
130. Bogomolov E A et al., in *Proc. of the 20th Intern. Cosmic Ray Conf.* Vol. 2 (1987) p. 72
131. Bogomolov E A et al., in *Proc. of the 21st Intern. Cosmic Ray Conf., Adelaide, Australia* Vol. 3 (1990) p. 288
132. Golden R L et al. *Astrophys. Lett.* 24 75 (1984)
133. Badhwar G D et al. *Astrophys. Space Sci.* 37 283 (1975)
134. Gaisser T K, Mauget B G *Astrophys. J.* 252 L57 (1981)
135. Stephens S A *Astrophys. Space Sci.* 76 87 (1981)
136. Peters B, Westergaard N J *Astrophys. Space Sci.* 48 21 (1977)
137. Hof M et al. *Astrophys. J.* 467 L33 (1996)
138. Basini G et al., in *Proc. of the 26th Intern. Cosmic Ray Conf., August 17–25, 1999, Salt Lake City, Utah, USA* Vol. 3 (Eds D Kieda, M Salamon, B Dingus) (1999) p. 77
139. Mitchell J W et al. *Phys. Rev. Lett.* 76 3057 (1996)
140. Boezio M et al. *Astrophys. J.* 487 415 (1997)
141. Gaisser T K, Schaefer R K *Astrophys. J.* 394 174 (1992)
142. Webber W R, Potgieter M S *Astrophys. J.* 344 779 (1989)
143. Boezio M et al. *Astrophys. J.* 561 787 (2001)
144. Matsumoto S et al., in *Energy Budget in the High Energy Universe. Proc. of the Intern. Workshop, Kashiwa, Japan, 22–24 February 2006* (Eds K Sato, J Hisano) (Singapore: World Scientific, 2007) p. 327
145. Simon M, Molnar A, Roesler S *Astrophys. J.* 499 250 (1998)
146. Menn W et al., in *Proc. of the 25th Intern. Cosmic Ray Conf., 30 July–6 August, 1997, Durban, South Africa* Vol. 3 (Eds M S Potgieter, C Raubenheimer, D J van der Walt) (Transvaal, South Africa: Potchefstroom Univ., 1997) p. 409
147. Kawrakow I, Mohring H J, Ranft J, in *27th Rencontres de Moriond: Electroweak Interactions and Unified Theories, 15–22 March 1992, Les Arcs, France* (1992) p. 449
148. Stochaj S J "Experimental measurement of low-energy antiprotons in the cosmic radiation", PhD Thesis (College Park, MD: Univ. Maryland, 1990)
149. Orito S et al. *Phys. Rev. Lett.* 84 1078 (2000)
150. Asaoka Y et al. *Phys. Rev. Lett.* 88 051101 (2002)
151. Mitchell J W et al. *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* 134 31 (2004)
152. Haino S et al. *Phys. Lett. B* 594 35 (2004)
153. Yamamoto A et al. *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* 166 62 (2007)
154. Yamamoto A et al. *IEEE Trans. Magn.* 24 1421 (1988)
155. Yamamoto A *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* 113 299 (2002)
156. Haino S et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* 518 167 (2004)
157. Sasaki M et al. *Adv. Space Res.* 42 450 (2008)
158. Abe K et al. (BESS Collab.) *Phys. Lett. B* 670 103 (2008)
159. Yoshimura K et al. *Adv. Space Res.* 42 1664 (2008)
160. Abe K et al. *Adv. Space Res.* 60 806 (2017)
161. Abe K et al. *Astrophys. J.* 822 65 (2016)
162. Yoshida T et al. *Adv. Space Res.* 33 1755 (2004)
163. Makida Y et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 15 1248 (2005)
164. Abe K et al. *Phys. Rev. Lett.* 108 051102 (2012)
165. Yamamoto A et al. *Adv. Space Res.* 51 227 (2013)
166. Adriani O et al. *Phys. Rev. Lett.* 105 121101 (2010)
167. Bieber J W et al. *Phys. Rev. Lett.* 83 674 (1999)
168. Labrador A W, Mewaldt R A *Astrophys. J.* 480 371 (1997)
169. Fisk L A *J. Geophys. Res.* 76 221 (1971)
170. Yamamoto A et al. *Adv. Space Res.* 42 442 (2008)
171. Haino S et al., in *Proc. of the 29th Intern. Cosmic Ray Conf. August 3–10, 2005, Pune, India* Vol. 3 (Eds B Sripathi Acharya et al.) (Mumbai: Tata Institute of Fundamental Research, 2005) p. 13
172. Beach A S et al. *Phys. Rev. Lett.* 87 271101 (2001)
173. Aguilar M et al. (AMS Collab.) "The Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) on the International Space Station: Part I — results from the test flight on the space shuttle" *Phys. Rep.* 366 331 (2002)
174. Aramaki T et al. *Astropart. Phys.* 59 12 (2014)
175. Picozza P et al. *Astropart. Phys.* 27 296 (2007)
176. Адриани О и др. *Письма в ЖЭТФ* 96 693 (2013); Adriani O et al. *JETP Lett.* 96 621 (2013)
177. Adriani O et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* 572 471 (2007)
178. Hooper D, Linden T, Mertsch P *J. Cosmol. Astropart. Phys.* 2015 (03) 021 (2015)
179. Kane G, Lu R, Watson S *Phys. Lett. B* 681 151 (2009)
180. Adriani O et al. *Nature* 458 607 (2009)
181. Matsunaga H et al. *Phys. Rev. Lett.* 81 4052 (1998)
182. Ptuskin V S et al. *Astrophys. J.* 642 902 (2006)
183. Fusco P *J. Phys. Conf. Ser.* 1390 012063 (2019)
184. Aguilar M et al. *Phys. Rep.* 894 1 (2021)
185. Hamaguchi K, Moroi T, Nakayama K *Phys. Lett. B* 747 523 (2015)
186. Kachelriess M, Moskalenko I V, Ostapchenko S S *Astrophys. J.* 803 54 (2015)
187. Chen Y-H, Cheung K, Tseng P-Y *Phys. Rev. D* 93 015015 (2016)
188. Yuan Q et al. *Phys. Rev. D* 95 083007 (2017)
189. Winkler M W *J. Cosmol. Astropart. Phys.* 2017 (02) 048 (2017)
190. Donato F et al. *Phys. Rev. D* 96 043007 (2017)
191. Lipari P *Phys. Rev. D* 95 063009 (2017)
192. Bresci V et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 488 2068 (2019)
193. Cuoco A, Krämer M, Korsmeier M *Phys. Rev. Lett.* 118 191102 (2017)
194. Reinert A, Winkler M W *J. Cosmol. Astropart. Phys.* 2018 (01) 055 (2018)
195. Cholis I, Linden T, Hooper D *Phys. Rev. D* 99 103026 (2019)
196. Cui M-Y et al. *Phys. Rev. Lett.* 118 191101 (2017)
197. Cuoco A et al. *Phys. Rev. D* 99 103014 (2019)
198. Carena M et al. *Phys. Rev. D* 100 055002 (2019)
199. Evoli C et al. *J. Cosmol. Astropart. Phys.* 2017 (02) 015 (2017)
200. Osteria G *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* 958 162201 (2020)
201. Stoessel A, in *38th Intern. Cosmic Ray Conf., ICRC2023, 26 July–3 August, 2023, Nagoya, Japan; PoS ICRC2023 1440* (2023)
202. Rogers F et al. *Astropart. Phys.* 145 102791 (2023)
203. Stoessel A "Status of the GAPS Instrument and Flight Campaigns", in *EPS-HEP 2024*
204. NASA Scientific Balloon Campaigns in Antarctica, <https://www.nasa.gov/blogs/scientific-balloons/>
205. Schael S et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* 944 162561 (2019)
206. Kirn T *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* 1040 167215 (2022)
207. Aguilar M et al. (AMS Collab.) *Phys. Rev. Lett.* 114 171103 (2015)
208. Adriani O et al. *Science* 332 69 (2011)
209. 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)
210. Adriani O et al. (CALET Collab.) *Phys. Rev. Lett.* 122 181102 (2019)
211. Yoon Y S et al. *Astrophys. J.* 839 5 (2017)
212. Cuoco A et al. *J. Cosmol. Astropart. Phys.* 2017 (10) 053 (2017)
213. Fuki M *Int. J. Mod. Phys. A* 20 6739 (2005)
214. McIlwain C E *Space Sci. Rev.* 5 585 (1966)
215. Pugacheva G, Martin I, Spjeldvik W J *Phys. Conf. Ser.* 409 012041 (2013)
216. Bickford J "Extraction of antiparticle concentrated in planetary magnetic fields", NIAC Phase II Year 1 Report, August 2007 (Cambridge, MA: Draper Laboratory, 2007); [http://www.centauri-dreams.org/wp-content/Bickford\\_Phase\\_II.pdf](http://www.centauri-dreams.org/wp-content/Bickford_Phase_II.pdf)
217. Bickford J et al., 37th COSPAR Presentation, D33-0012-08
218. Pöschl T et al., in *Proc. of the 34th Intern. Cosmic Ray Conf., ICRC2015, 30 July–6 August, 2015, The Hague, The Netherlands; PoS ICRC2015 590* (2015)
219. Huang C-Y *Astropart. Phys.* 27 440 (2007)
220. Clark G W *Phys. Rev.* 108 450 (1957)
221. Alexandreas D E et al. *Phys. Rev. D* 43 1735 (1991)
222. Urban M et al. *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* 14 223 (1990)
223. Amenomori M et al. (Tibet AS $\gamma$  Collab.) *Phys. Rev. D* 47 2675 (1993)
224. Borione A et al. *Phys. Rev. D* 49 1171 (1994)
225. Ambrosio M et al. *Astropart. Phys.* 20 145 (2003)
226. Achard P et al. *Astropart. Phys.* 23 411 (2005)
227. Amenomori M et al. *Astropart. Phys.* 28 137 (2007)

228. Bartoli B et al. (ARGO-YBJ Collab.) *Phys. Rev. D* **85** 022002 (2012)
229. Abeyssekara A U et al. (HAWC Collab.) *Phys. Rev. D* **97** 102005 (2018)
230. Cobb J H et al. (The Soudan 2 Collab.) *Phys. Rev. D* **61** 092002 (2000)
231. Adamson P et al. *Astropart. Phys.* **34** 457 (2011)
232. Bartoli B et al. *Nuovo Cimento C* **24** 669 (2001)
233. Aartsen M G et al. (IceCube Collab.) *Phys. Rev. D* **89** 102004 (2014)
234. Albert A et al. *Eur. Phys. J. C* **78** 1006 (2018)
235. Bird R, in *Proc. of the 34th Intern. Cosmic Ray Conf., ICRC2015, 30 July–6 August, 2015. The Hague, The Netherlands; PoS ICRC2015* 852 (2016)
236. Nan Yu et al., in *Proc. 37th Intern. Cosmic Ray Conf., 2021; PoS ICRC2021* 350 (2021)
237. Wang Y et al., in *Proc. 37th Intern. Cosmic Ray Conf., 2021; PoS ICRC2021* 356 (2021)
238. Shuwang Cui et al., in *Proc. 38th Intern. Cosmic Ray Conf., 2023; PoS ICRC2023* 463 (2023)
239. Maburee J et al. *J. Phys. Conf. Ser.* **2653** 012026 (2023)
240. Antipov Yu M, Vishnevskii N K, Gorin Yu P "Production of negative particles with low momenta by 70-GeV protons" (Serpukhov: Inst. of High-Energy Physics, 1971)
241. Antipov Yu M et al. *Phys. Lett. B* **34** 164 (1971)
242. The STAR Collab. "Erratum: Observation of the antimatter helium-4 nucleus" *Nature* **475** 412 (2011)
243. De La Torre Luque P, Winkler M W, Linden T *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **2024** (10) 017 (2024)
244. Duperray R et al. *Phys. Rev. D* **71** 083013 (2005)
245. Cirelli M et al. *J. High Energy Phys.* **2014** (08) 09 (2014)
246. Blum K et al. *Phys. Rev. D* **96** 103021 (2017)
247. Oliva A, Tomassetti N, Feng J "Production of antimatter nuclei in Galactic cosmic rays", arXiv:1707.06918
248. Kachelries M M, Ostapchenko S, Tjemsland J J. *Cosmol. Astropart. Phys.* **2020** (08) 048 (2020)
249. Allkofer O C, Brockhausen D P *Astrophys. Space Sci.* **109** 145 (1985)
250. Evenson P *Astrophys. J.* **176** 797 (1972)
251. Cholis I, Linden T, Hooper D *Phys. Rev. D* **102** 103019 (2020)
252. Winkler M W, Linden T *Phys. Rev. Lett.* **126** 101101 (2021)
253. Korwar M, Profumo S *Phys. Rev. D* **111** 023032 (2025)
254. Donato F, Fornengo N, Maurin D *Phys. Rev. D* **78** 043506 (2008)
255. Streitmatter R E *Nuovo Cimento C* **19** 835 (1996)
256. Von Doetinchem P et al. *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **2020** (08) 035 (2020)
257. Bykov A M et al. *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **2023** (08) 027 (2023)
258. Golubkov V et al. *Symmetry* **14** 1953 (2022)
259. Bondar A E et al. *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **2022** (03) 009 (2022)
260. Khlopov M Yu, Kirichenko A O, Mayorov A G "Anihelium flux from antimatter globular cluster", arXiv:2011.06973
261. Smoot G F, Buffington A, Orth C D *Phys. Rev. Lett.* **35** 258 (1975)
262. Ormes J F et al. *Astrophys. J.* **482** L187 (1997)
263. Takayuki S et al. *Phys. Lett. B* **422** 319 (1998)
264. Sasaki M et al. *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **113** 202 (2002)
265. Abe K et al. *Phys. Rev. Lett.* **108** 131301 (2012)
266. Badhwar G D et al. *Nature* **274** 137 (1978)
267. Golden R L et al. *Astrophys. J.* **479** 992 (1997)
268. Alcaraz J et al. *Phys. Lett. B* **461** 387 (1999)
269. Майоров А Г и др. *Письма в ЖЭТФ* **93** 704 (2011); Mayorov A G et al. *JETP Lett.* **93** 628 (2011)
270. Adriani O et al. *Phys. Rep.* **544** 323 (2014)
271. AMS Collab. "Unlocking the Secrets of the Cosmos: The First Five Years of AMS on the International Space Station. 19 мая 2016" (Accessed: 18.07.2024), <https://ams02.space/news/unlocking-secrets-cosmos-first-five-years-ams-international-space-station>
272. Gargiulo C "AMS-02: Status and Latest Results", CERN EP Detector Seminar Geneva, Switzerland, May 2025. (Accessed: 2025-08-14), [https://indico.cern.ch/event/1542546/attachments/3064290/5420478/20250509\\_AMS\\_CorradoGargiulo.pdf](https://indico.cern.ch/event/1542546/attachments/3064290/5420478/20250509_AMS_CorradoGargiulo.pdf)
273. Ting S, 44th COSPAR Scientific Assembly, 16–24 July (2022) 3071
274. Choutko V, 44th COSPAR Scientific Assembly, 16–24 July (2022) 2083
275. Poulin V et al. *Phys. Rev. D* **99** 023016 (2019)
276. Ibarra A, Wild S *Phys. Rev. D* **88** 023014 (2013)
277. Fuke H et al. *Phys. Rev. Lett.* **95** 081101 (2005)
278. Sakai K et al. (BESS Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **132** 131001 (2024)
279. Dal L A, Raklev A R *Phys. Rev. D* **89** 103504 (2014)
280. Korsmeier M, Donato F, Fornengo N *Phys. Rev. D* **97** 103011 (2018)
281. Herms J et al. *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **2017** (02) 018 (2017)
282. Aramaki T et al. *Phys. Rep.* **618** 1 (2016)
283. Oliva A "Anti-Nuclei in Primary Cosmic Rays with the AMS on the ISS" (2019) p. 14
284. Oliva A, CERN Colloquium: Cosmic Rays, Antimatter, and Dark Matter, <https://indico.cern.ch/event/1275785/>; Presentation slides, slide 88. 2023: <https://indico.cern.ch/event/1275785/attachments/2663918/4616641/CERN%20Colloquium-June-8-2023.pdf>
285. Kirn T, in *Proc. Vienna Conf. on Instrumentation, VCI 2022, Vienna, Austria, February 2022*; Conf. presentation, <https://indico.cern.ch/event/1044975/contributions/4663642/>
286. Mori K et al. *Astrophys. J.* **566** 604 (2002)

## Experimental research on antiprotons and light antinuclei in cosmic rays

A.G. Mayorov, S.A. Rodenko\*, K.S. Chelidze, R.F. Yulbarisov

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),

Kashirskoe shosse 31, 115409 Moscow, Russian Federation

E-mail: \*sarodenko@mephi.ru

This review summarizes recent experimental studies of antiparticles in cosmic rays, including antiprotons, antideuterons, and antihelium nuclei. The discussion is centered on results from both direct and indirect measurements of the galactic component, while a separate section addresses secondary antiparticles (albedo), among them particles trapped in the Earth's magnetic field and part of the radiation belts. To provide historical context, the review also outlines the earliest accelerator-based experiments in which light antinuclei were first detected, thereby establishing the fundamental possibility of their existence in nature. A detailed overview is given of balloon-borne, satellite, and ground-based missions dedicated to measurements of the antiproton energy spectrum across a wide interval — from several hundred MeV to several hundred GeV — with indirect estimates extending to energies above 1 TeV. Particular attention is devoted to recent progress in searches for heavier antinuclei, such as antideuterons and antihelium nuclei, which hold significant promise for studies of dark matter and the baryon asymmetry of the Universe. Finally, prospects for future experiments are considered in light of current observational constraints and technological challenges.

**Keywords:** antiprotons, antinuclei, sources of antinuclei, antiproton detection experiments, cosmic rays

PACS number: 96.50.S–

Bibliography — 286 references

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **196** (6) 563–600 (2026)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2025.12.040063>

Received 22 September 2025, revised 25 November 2025

*Physics – Uspekhi* **69** (6) (2026)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2025.12.040063>