

## **Захваченные антипротоны в радиационном поясе земли по данным эксперимента ПАМЕЛА**

**Ю.Т. Юркин<sup>1</sup>, А.М. Гальпер<sup>1</sup>, С.А. Воронов<sup>1</sup>, Л.А. Гришанцева<sup>1</sup>,  
С.В. Колдашов<sup>1</sup>, В.В. Михайлов<sup>1</sup>, М.Д. Хеймиц<sup>1</sup> от  
коллорабии ПАМЕЛА**

<sup>1</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»; ytyurkin@mephi.ru

### **Аннотация**

Существование захваченных антипротонов в радиационном поясе Земли было теоретически предсказано, но ранее не наблюдалось. В данной работе приводится методика выделения антипротонов и результаты наблюдения в космическом эксперименте ПАМЕЛА. Магнитный спектрометр ПАМЕЛА позволяет надежно идентифицировать тип частиц, знак и величину заряда, измерять энергию, что дало возможность впервые зарегистрировать захваченные антипротоны в Бразильской аномалии.

### **Введение**

Внутренний радиационный пояс Земли в основном состоит из захваченных магнитным полем протонов. Основной механизм рождения захваченных протонов – распад нейтронов, которые появляются в результате взаимодействия космических лучей с верхними слоями атмосферы. Тот же механизм должен рожать и антинейтроны, а, следовательно, и захваченные антипротоны.

Первое измерение потока захваченных антипротонов было предпринято в эксперименте Мария-2 [1] на орбитальных станциях «Салют-7» и «Мир», однако, был получен лишь верхний предел отношения потока антипротонов к потоку протонов равный  $5 \cdot 10^{-3}$ .

Расчет потока захваченных антипротонов приведен, в частности, в работе [2].

Цель данной работы – регистрация факта существования антипротонов, захваченных во внутреннем радиационном поясе Земли, с помощью магнитного спектрометра ПАМЕЛА.

## **1 Научная аппаратура магнитный спектрометр ПАМЕЛА**

Магнитный спектрометр ПАМЕЛА был запущен с космодрома Байконур 15 июня 2006 года на борту искусственного спутника Земли «Ресурс-ДК1». Спутник имеет эллиптическую орбиту с наклонением 70.00 и высотой от 350 км до 610 км. Прибор ПАМЕЛА может идентифицировать заряженные частицы космических лучей в энергетическом диапазоне  $10^7$ – $10^{12}$  эВ, используя набор детекторов, включающий времяпролетную систему, магнитный спектрометр, стриповый калориметр. Измеряются спектры космических лучей (протонов, электронов и соответствующих античастиц), а также отношение потоков античастиц и частиц. Результаты измерений в диапазоне энергий 1–100 ГэВ представлены в публикациях [4, 5].

Траектория КА «Ресурс-ДК1» проходит через Южно-Атлантическую Магнитную Аномалию, что позволяет производить измерения потоков частиц, захваченных геомагнитным полем.

Основной частью прибора является магнитный спектрометр на постоянном магните, в котором помещен кремниевый трекер. Измерение траекторий выполняется с помощью шести слоев толщиной по 0.3 мм, на обеих сторонах которых размещены микрострипы, направления которых перпендикулярны друг к другу. Средняя величина индукции магнитного поля составляет 0.43 Тл. Для каждой частицы определяется жесткость (отношение импульса к заряду) путем измерения отклонения траектории от прямой. Сэмплинговый калориметр, состоящий из 22 вольфрамовых пластин, прослоенных микростриповыми детекторами, расположен под спектрометром. Сцинтилляционный детектор, регистрирующий часть ливня, выходящую из калориметра, и нейтронный детектор, состоящий из счетчиков  $^3\text{He}$ , окруженных полиэтиленовым замедлителем, составляют нижнюю часть прибора. Времяпролетная система, состоящая из трех двойных слоев сцинтилляционных пластин, измеряет скорость ( $\beta = v/c$ ) и потери энергии ( $dE/dx$ ), что дает возможность идентифицировать частицы при низких

энергиях. Частицы, попадающие в прибор вне апертюры, вызывают срабатывание антисовпадательной системы. Подробное описание прибора ПАМЕЛА приведено в работе [3].

## 2 Идентификация антипротонов

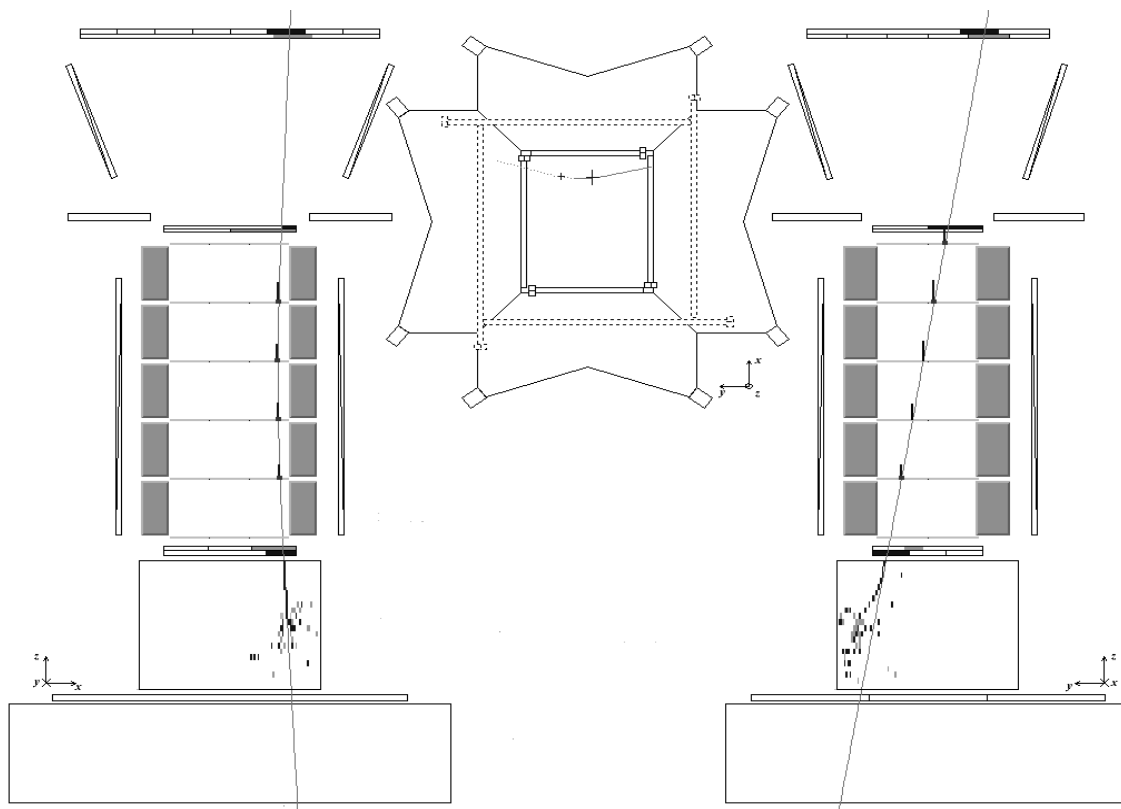
Частица, зарегистрированная прибором ПАМЕЛА, проходит шесть слоев пластического сцинтиллятора, составляющих времяпролетную систему, шесть слоев кремниевых детекторов трекера и попадает в калориметр. В каждом слое измеряется и записывается энерговыделение. Выделив частицы, не испытавшие взаимодействия до попадания в калориметр, можно получить до 12 независимых измерений потери энергии на ионизацию. Имея ионизационные потери энергии, траекторию, определенную трекером, и скорость частицы (измеренную времяпролетной системой) можно вычислить заряд и массу частицы.

Так как цель данной работы – обнаружение захваченных антипротонов, мы накладываем очень жесткие требования к отбору событий. Важно убедиться, что зарегистрированные антипротоны не являются имитацией. Возможные источники имитации – электроны, пионы, каоны и рассеявшиеся протоны. Для исключения частиц, имеющих отношение массы к заряду, отличающиеся от отношения массы к заряду антипротонов, используем зависимость от жесткости скорости и ионизационных потерь. Для выделения антипротонов был использован тот факт, что при одинаковых значениях импульса протоны и антипротоны имеют равные значения скорости и ионизационных потерь. Из полного числа зарегистрированных событий были отобраны события с единственным треком со значением жесткости (по модулю) более 0.4 ГВ/с и менее 1.5 ГВ/с. Для каждого события были измерены значения жесткости,  $\beta$  и ионизационные потери в каждом слое. Таким образом, для протонов и для электронов были определены по полетным данным распределения  $\beta$  и ионизационных потерь, которые зависят от жесткости. Для каонов и пионов эти распределения были вычислены по соответствующим массам частиц. Для каждого события измерено до 13 величин. Каждая величина имеет известное распределение, которое зависит от проверяемой гипотезы: протон (антипротон), электрон, пион, каон. Это позволило для каждой зарегистрированной частицы вычислить вероятность каждой гипотезы.

Для выделения захваченных частиц были отобраны события в области геомагнитных координат МакИлвайна  $1.1 < L < 1.5$  и  $B < 0.23$ , то есть принадлежащие Южно-Атлантической Магнитной Аномалии. При этом к антипротонам отнесены частицы с отрицательной жесткостью, для которых вероятность гипотезы, что это антипротон, более 0.1, и вероятность гипотезы, что это каон, менее 10–4. Точно такой же отбор был проведен для событий с положительной жесткостью, то есть протонов. Такие жесткие критерии привели к тому, что была отброшена значительная часть антипротонов, но не вызывает сомнения, что отобранные события действительно антипротоны, а не их имитация каонами, пионами или электронами. Отбор прошли всего шесть антипротонных событий и 580000 протонных событий.

Существует малая вероятность имитации антипротонов протонами, рассеявшимися в трекере. При этом изменяется кривизна траектории и, следовательно, трекер неправильно определяет жесткость частицы. Однако, у всех событий, удовлетворяющих критериям отбора, измеренные значения скорости и ионизационных потерь соответствуют антипротонам или протонам, имеющим измеренное значение жесткости. Поскольку скорость и ионизационные потери связаны с импульсом, рассеяние должно было бы изменить только знак жесткости, оставив неизменной ее величину. Вероятность такого рассеяния для протонов в исследуемом диапазоне энергий менее  $10^{-7}$ .

В выбранном диапазоне энергий протоны и антипротоны останавливаются в калориметре. Глубина проникновения для них составляет от четырех до шестнадцати слоев калориметра. При этом протонные события имеют одиночный трек, а антипротонные события одиночный трек, в конце которого происходит аннигиляция и наблюдается разлет аннигиляционных продуктов. Подтверждением того, что все шесть отобранных антипротонов действительно являются антипротонами, служит характерная картина аннигиляции в калориметре, которая не наблюдается ни в одном протонном событии. На рисунке 1 показано одно из антипротонных событий.



**Рис. 1.** Визуализация антипротонного события.

В таблице 1 приведены характеристики отобранных антипротонов. Для всех событий угол траектории с направлением магнитной индукции (питч-угол) близок к 90 градусам, то есть антипротоны захвачены магнитным полем Земли.

| Номер | Жесткость,<br>ГВ/с | $E_{kin}$ ,<br>МэВ | вероятность<br>антипротона | вероятность<br>каона | вероятность<br>электрона | Питч угол, град |
|-------|--------------------|--------------------|----------------------------|----------------------|--------------------------|-----------------|
| 1     | -1,222             | 600 <sub>0</sub>   | 0,92                       | $3 \cdot 10^{-4}$    | $8 \cdot 10^{-6}$        | 89              |
| 2     | -1,115             | 520                | 0,19                       | $7 \cdot 10^{-6}$    | $4 \cdot 10^{-11}$       | 90              |
| 3     | -0,6872            | 220                | 0,83                       | $5 \cdot 10^{-17}$   | $5 \cdot 10^{-49}$       | 93              |
| 4     | -0,8278            | 410                | 0,69                       | $7 \cdot 10^{-10}$   | $7 \cdot 10^{-28}$       | 93              |
| 5     | -0,9926            | 330                | 0,13                       | $6 \cdot 10^{-14}$   | $1 \cdot 10^{-24}$       | 87              |
| 6     | -0,6706            | 220                | 0,91                       | $5 \cdot 10^{-20}$   | $2 \cdot 10^{-51}$       | 91              |

Таблица 1. Параметры, отобранных антипротонов.

## Заключение

Впервые зарегистрированы антипротоны, захваченные магнитным полем Земли в радиационном поясе. Отношение потока антипротонов к потоку протонов составляет  $10^{-5}$ , что не противоречит расчетным данным работы [2].

## Список литературы

- [1] Воронов С.А., Гальпер А.М., Колдашов С.В., Масленников Л.В., Михайлов В.В., Попов А.В. // Космические исследования. 1990. Т. 28. Вып. 4. С. 632.
- [2] Selesnick R.S., Looper M.D., Mewaldt R.A., Labrador A.W. // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. P. 20.
- [3] Picozza P., Galper A.M., Castellini G. et al. // Astropart. Phys. 2007. V. 27. P. 296.
- [4] Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al. // Nature. 2009. V. 458. P. 607.
- [5] Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al. // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 102. P. 051101-1..