

**ИЗМЕРЕНИЕ ПОТОКОВ ПРОТОНОВ ПРЯМОГО И ВОЗВРАТНОГО АЛЬБЕДО  
В ЭКСПЕРИМЕНТЕ PAMELA**

<sup>1</sup>О.А. Голуб, <sup>1</sup>А.Г. Майоров, <sup>2,3</sup>О. Адриани, <sup>6</sup>Г.А. Базилевская, <sup>4,5</sup>Дж. Барбарино, <sup>7,8</sup>Р. Белотти, <sup>9</sup>М. Боецио, <sup>10</sup>Э.А. Богомолов, <sup>2,3</sup>М. Бонджи, <sup>9</sup>В. Бонвичини, <sup>3</sup>С. Боттай, <sup>7,8</sup>А. Бруно, <sup>12</sup>К. де Сантис, <sup>12,15</sup>В. ди Феличе, <sup>9,19</sup>А. Вакки, <sup>2</sup>Е. Ваннучини, <sup>10</sup>Г.И. Васильев, <sup>1</sup>С.А. Воронов, <sup>1</sup>А.М. Гальпер, <sup>9</sup>Дж. Зампа, <sup>9</sup>Н. Зампа, <sup>12,13</sup>М. Казолино, <sup>5</sup>Д. Кампана, <sup>1</sup>А.В. Карелин, <sup>11</sup>П. Карлсон, <sup>14</sup>Дж. Касетеллини, <sup>8</sup>Ф. Кафанья, <sup>6</sup>А.Н. Квашин, <sup>1</sup>С.А. Колдобский, <sup>1</sup>С.В. Колдашев, <sup>10</sup>С.Ю. Крутьков, <sup>1</sup>А.А. Леонов, <sup>1</sup>В.В. Малахов, <sup>12</sup>Л. Марчелли, <sup>16,18</sup>М. Мартуччи, <sup>17</sup>В. Мени, <sup>12,16</sup>М. Мерге, <sup>1</sup>В.В. Михайлов, <sup>9</sup>Е. Мокьютти, <sup>7,8</sup>А. Монако, <sup>3</sup>Н. Мори, <sup>9</sup>Р. Мунини, <sup>5</sup>Дж. Остерия, <sup>5</sup>Б. Панико, <sup>3</sup>П. Папини, <sup>11</sup>М. Пирс, <sup>12,16</sup>П. Пикоцца, <sup>18</sup>М. Риччи, <sup>2,14</sup>С. Риччиарини, <sup>1</sup>С.А. Роденко, <sup>17</sup>М. Симон, <sup>12,16</sup>Р. Спарволи, <sup>2,3</sup>П. Спилантини, <sup>6</sup>Ю.И. Стожков, <sup>1</sup>Р.Ф. Юлбарисов, <sup>1</sup>Ю.Т. Юркин

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия  
ogolub394@gmail.com

<sup>2</sup>Физический факультет, Флорентийский университет, Флоренция, Италия

<sup>3</sup>Национальный институт ядерной физики, Флоренция, Италия

<sup>4</sup>Физический факультет, Неаполитанский университет имени Фридриха II, Неаполь, Италия

<sup>5</sup>Национальный институт ядерной физики, Неаполь, Италия

<sup>6</sup>Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

<sup>7</sup>Университет Бари Альдо Моро, Бари, Италия

<sup>8</sup>Национальный институт ядерной физики, Бари, Италия

<sup>9</sup>Национальный институт ядерной физики, Триест, Италия

<sup>10</sup>Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

<sup>11</sup>Физический факультет и Центр физики космических частиц им. Оскара Клейна, Стокгольм, Швеция

<sup>12</sup>Национальный институт ядерной физики, Рим, Италия

<sup>13</sup>Институт передовых наук Вако-Ши, Сайтама, Япония

<sup>14</sup>Институт прикладной физики им. Нелло Каррары, Фьюрентино, Италия

<sup>15</sup>Центр космических научных данных, Фраскати, Италия

<sup>16</sup>Римский университет Тор Вергата, Рим, Италия

<sup>17</sup>Университет г. Зиген, Зиген, Германия

<sup>18</sup>Национальная лаборатория Фраскати им. Э. Ферми, Национальный институт ядерной физики Фраскати, Италия

<sup>19</sup>Факультет математики и информатики, университет Удине, Удине, Италия

**MEASUREMENT OF THE SPLASH AND REENTRANT ALBEDO PROTON FLUX  
IN THE PAMELA EXPERIMENT**

<sup>1</sup>O.A. Golub, <sup>1</sup>A.G. Mayorov, <sup>2,3</sup>O. Adriani, <sup>4,5</sup>G.C. Barbarino, <sup>6</sup>G.A. Bazilevskaya, <sup>7,8</sup>R. Bellotti, <sup>9</sup>M. Boezio, <sup>10</sup>E.A. Bogomolov, <sup>2,3</sup>M. Bongi, <sup>9</sup>V. Bonvicini, <sup>3</sup>S. Bottai, <sup>7,8</sup>A. Bruno, <sup>8</sup>F. Cafagna, <sup>5</sup>D. Campana, <sup>11</sup>P. Carlson, <sup>12,13</sup>M. Casolino, <sup>14</sup>G. Castellini, <sup>12</sup>C. de Santis, <sup>12,15</sup>V. di Felice, <sup>1</sup>A.M. Galper, <sup>1</sup>A.V. Karelin, <sup>1</sup>S.V. Koldashov, <sup>1</sup>S.A. Koldobskiy, <sup>10</sup>S.Y. Krutkov, <sup>6</sup>A.N. Kvashnin, <sup>1</sup>A.A. Leonov, <sup>1</sup>V. Malakhov, <sup>12</sup>L. Marcelli, <sup>16,18</sup>M. Martucci, <sup>17</sup>W. Menn, <sup>12,16</sup>M. Merge, <sup>1</sup>V.V. Mikhailov, <sup>9</sup>E. Mocchiutti, <sup>7,8</sup>A. Monaco, <sup>9</sup>R. Munini, <sup>3</sup>N. Mori, <sup>5</sup>G. Osteria, <sup>5</sup>B. Panico, <sup>3</sup>P. Papini, <sup>11</sup>M. Pearce, <sup>12,16</sup>P. Picozza, <sup>18</sup>M. Ricci, <sup>3,14</sup>S.B. Ricciarini, <sup>1</sup>S.A. Rodenko, <sup>17</sup>M. Simon, <sup>12,16</sup>R. Sparvoli, <sup>2,3</sup>P. Spillantini, <sup>6</sup>Y.I. Stozhkov, <sup>9,19</sup>A. Vacchi, <sup>2</sup>E. Vannuccini, <sup>10</sup>G.I. Vasilyev, <sup>1</sup>S.A. Voronov, <sup>1</sup>Y.T. Yurkin, <sup>9</sup>G. Zampa, <sup>9</sup>N. Zampa, <sup>1</sup>R.F. Yulbarisov

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia  
ogolub394@gmail.com

<sup>2</sup>Department of Physics, University of Florence, Sesto Fiorentino, Italy

<sup>3</sup>INFN, Sezione di Firenze, Sesto Fiorentino, Italy

<sup>4</sup>Department of Physics, University of Naples “Federico II”, Naples, Italy

<sup>5</sup>INFN, Sezione di Napoli, Naples, Italy

<sup>6</sup>Lebedev Physical Institute, Moscow, Russia

<sup>7</sup>University of Bari, Bari, Italy

<sup>8</sup>INFN, Sezione di Bari, Bari, Italy

<sup>9</sup>INFN, Sezione di Trieste, Trieste, Italy

<sup>10</sup>Toffe Physical Technical Institute, St. Petersburg, Russia

<sup>11</sup>KTH, Department of Physics, and the Oskar Klein Centre for Cosmoparticle Physics, AlbaNova University Centre, Stockholm, Sweden

<sup>12</sup>INFN, Sezione di Roma II “Tor Vergata”, Rome, Italy

<sup>13</sup>RIKEN, Advanced Science Institute — Wako-shi, Saitama, Japan

<sup>14</sup>IFAC, Sesto Fiorentino, Italy

<sup>15</sup>Agenzia Spaziale Italiana (ASI) Science Data Center, Frascati, Italy

<sup>16</sup>Department of Physics, University of Rome “Tor Vergata”, Rome, Italy

<sup>17</sup>Department of Physics, Universitaet Siegen, Siegen, Germany

<sup>18</sup>INFN, Laboratori Nazionali di Frascati — Via Enrico Fermi, Frascati, Italy

<sup>19</sup>Department of Mathematics and Informatics, University of Udine, Udine, Italy

**Аннотация** Работа посвящена измерению дифференциальных энергетических спектров протонов прямого и возвратного альbedo в разных областях околоземного пространства с использованием данных, полученных спектрометром PAMELA. При помощи моделирования прохождения частиц через прибор PAMELA в среде Geant 4 выбраны критерии отбора для идентификации протонов прямого и возвратного альbedo. Полученные критерии применены к экспериментальным данным и после проведенной обработки и анализа восстановлены дифференциальные энергетические спектры протонов прямого и возвратного альbedo для низких и высоких геомагнитных широт.

**Ключевые слова:** космические лучи, прямое альbedo, возвратное альbedo.

**Abstract.** The work covers the measurement of differential energy spectra of protons of splash and reentrant albedo in different regions of near-Earth space using data obtained with the PAMELA spectrometer. With the help of simulation the passage of particles through the PAMELA device in the Geant 4 environment, the selection criteria for of splash albedo protons identification and reentrant albedo protons identification were chosen. The developed criteria were applied to the experimental data and after the processing and analysis the differential energy spectra of the protons of the direct and return albedo were obtained for low and high geomagnetic latitudes..

**Keywords:** cosmic rays, splash albedo, reentrant albedo.

## ВВЕДЕНИЕ

Частицы альbedo широко изучаются с 1950-х гг., но до сих пор существует множество не решённых проблем, которые сохраняют научный интерес к этой теме. Измерения потоков протонов альbedo проводились на азростатах [Verma, 1967], космических аппаратах и искусственных спутниках Земли (ИСЗ) ([AMS Collaboration, 2000; Bidoli, 2002]). Экспериментальные данные NINA и NINA-2 представляют информацию о потоках вторичных протонов в области низких энергий от 10 до 35 МэВ. Наоборот, в эксперименте AMS-01 измерены потоки протонов прямого и возвратного альbedo в области высоких энергий 0.1–200 ГэВ. Тем не менее, этих экспериментальных данных недостаточно для полного понимания процессов образования частиц альbedo в атмосфере и их движения в магнитном поле Земли. Международный научный спутниковый эксперимент PAMELA [Adriani, 2007], предназначенный для изучения потоков заряженных частиц в космическом излучении, позволяет регистрировать не только частицы галактического космического излучения, но также и частицы альbedo, включая прямые. Эксперимент PAMELA дает возможность провести независимые прецизионные измерения потоков протонов прямого и возвратного альbedo в широком энергетическом диапазоне в различных областях околоземного пространства.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИБОРА PAMELA В СРЕДЕ GEANT4

Основной целью работы является восстановление дифференциальных энергетических спектров протонов прямого и возвратного альbedo. Для этого необходимо подобрать критерии для отбора частиц прямого и возвратного альbedo. Подбор критериев проводился с помощью моделирования методом Монте-Карло прохождения частиц через спектрометр PAMELA при помощи программного обеспечения, написанного и применяемого в коллаборации PAMELA на основе GEANT4. Необходимо выделить невзаимодействующие в спектрометре частицы, отобрать из них протоны (одиночный положительный заряд) и определить направление прилета. Исключение фоновых событий и выделение «чистого» трека необходимо из-за того, что при взаимодействиях частица теряет некоторую долю энергии или превращается в

другие типы, что вызывает сложности в определении ее начальных параметров. В зависимости от того, с какой стороны прилетела частица (сверху или снизу), путь от момента попадания в прибор до регистрации трековой системой различен. В связи с этим и критерии отбора для таких частиц будут отличаться. Для выделения невзаимодействующих летящих сверху вниз частиц были подобраны базовые критерии отбора, для частиц летящих снизу вверх были подобраны дополнительные критерии отбора.

Базовые критерии отбора позволяют исключить из анализа события с заведомо неправильно измеренными характеристиками (магнитная жесткость частицы, скорость частицы). Также базовые критерии отбора исключают из анализа «ложные» триггеры, вызванные вторичными частицами, образованными во взаимодействиях космических лучей с веществом прибора. Все дополнительные критерии необходимы для отсеивания взаимодействующих частиц в калориметре.

Выработанные критерии отбора применены к моделированию и по полученным данным была рассчитана светосила прибора. На рис. 1 представлена зависимость значений светосилы от жесткости для базовых и дополнительных критериев отбора.

## ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Область 1 на графике соответствует частицам с жесткостью больше жесткости геомагнитного обрезания — это галактические космические лучи. В область 2 проникновение галактических частиц осложнено — это область пенумбры. Наконец, в области 3 проникновение галактических частиц запрещено и регистрируемые здесь события относятся к частицам возвратного альbedo.

Следует отметить, что спектры возвратного альbedo, измеренного при разных критериях отбора, согласуются между собой. Спектры прямого и возвратного альbedo согласуются между собой в области 3, как и ожидалось. Так как галактические частицы не могут прилететь в направлении «от Земли», в области 2 удалось измерить непосредственно поток частиц прямого альbedo.

На рис. 3 представлен дифференциальные энергетические спектры протонов прямого и возвратного альbedo для высоких широт.

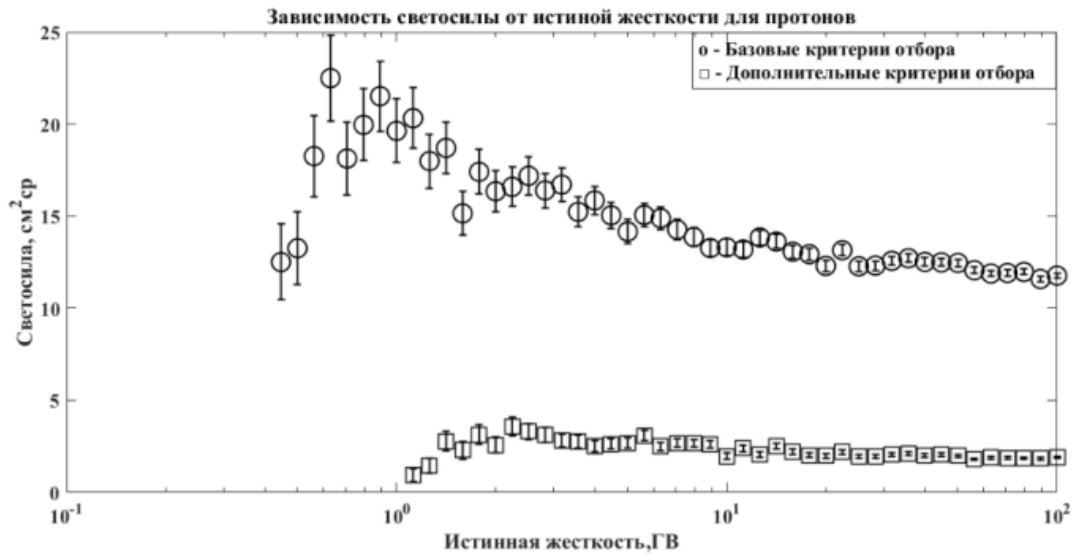


Рис. 1. Зависимость светосилы от жесткости для протонов

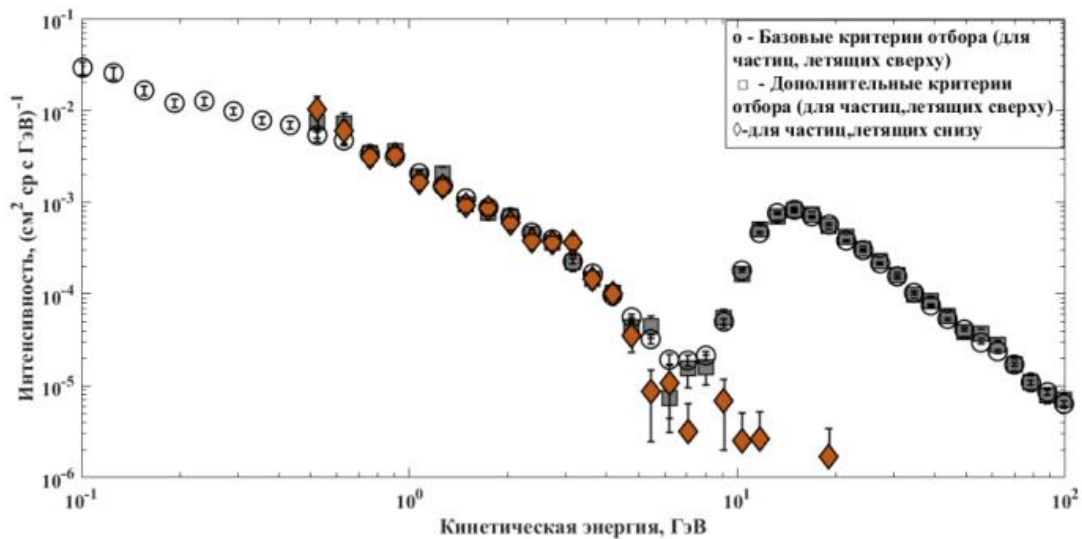


Рис. 1. Дифференциальные энергетические спектры протонов прямого и возвратного альбеда, а также ГКЛ по данным эксперимента PAMELA

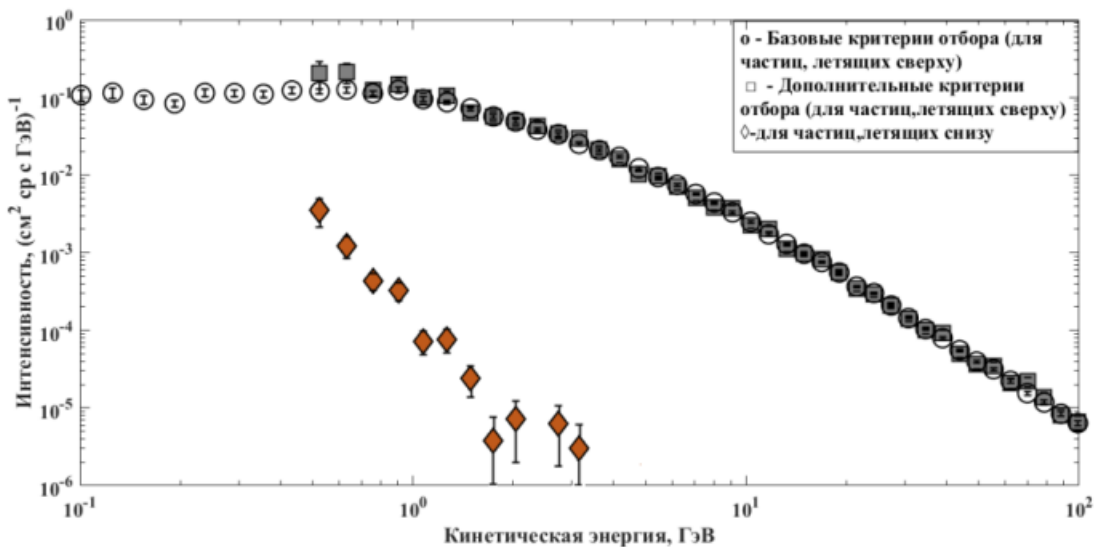


Рис. 2. Дифференциальные энергетические спектры протонов прямого и возвратного альбеда, а также ГКЛ по данным эксперимента PAMELA

На высоких широтах выделить потоки возвратного альbedo с прибором, ориентированным в только космос, невозможно, поскольку они «тонут» в потоке галактических космических лучей. Регистрация прибором PAMELA частиц, даже в приполярных областях.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В работе создана методика идентификации протонов прямого альbedo в эксперименте PAMELA, которая применена к экспериментальным данным спектрометра PAMELA, накопленным в период работы с 19 июля 2006 до 26 марта 2007 г. Восстановлены дифференциальные энергетические спектры протонов прямого и возвратного альbedo в различных диапазонах геомагнитных широт.

На низких геомагнитных широтах, как и ожидалось, в спектре выделяются три области: галактических частиц, пенумбры и частиц альbedo. Результаты, полученные разными критериями отбора событий, согласуются между собой, подтверждая достоверность результатов. Измерен спектр частиц альbedo в области, пенумбры. На высоких геомагнитных широтах, где доминирует галактическое излучение,

также восстановлен дифференциальный энергетический спектр протонов альbedo, что является новым результатом.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России № 3.2131.2017/ПЧ.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

AMS Collaboration. Protons in near earth orbit // *Phys. Lett. B*. 2000. V. 472. PP. 215–226

Sullivan J.D. Geometrical factor and directional response of single and multi-element particle telescopes // *Nuclear Instruments and Methods*. 1971. V. 95. PP. 5–11.

Adriani O. et al. PAMELA — A Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics // *Astroparticle Phys.* 2007. V.27. PP. 296–315.

Verma S.D. Measurement of Charged Splash and Re-Entrant Albedo of the Cosmic Radiation // *J. Geophys. Res.* 1967. V. 72. P. 915–925.

Bidoli V., et al. Energy spectrum of secondary protons above the atmosphere measured by the instruments NINA and NINA2 // *Ann. Geophys.* 2002. V. 20. P. 1693–1697.