

Регистрация изменения отношения темпов счета “север–юг” частиц космических лучей высоких энергий во время перемены полярности магнитного поля Солнца

А. В. Карелин^{a1)}, О. Адриани^{b,c2)}, Дж. Барбарино^{d,e2)}, Г. А. Базилевская^f, Р. Белотти^{g,h2)}, М. Боециоⁱ²⁾,
 Э. А. Богомолов^j, М. Бонджи^{c2)}, В. Бонвичиниⁱ²⁾, С. Боттаи^{c2)}, А. Бруно^{g,h2)}, А. Ваккиⁱ²⁾,
 Е. Вануччини^{c2)}, Г. И. Васильев^j, С. А. Воронов^a, А. М. Гальпер^a, К. Де Донато^{k,l2)}, К. Де Сантис^{k,l2)}, Н. Де
 Симоне^{k,l2)}, В. Де Феличе^{k2)}, Дж. Зампаⁱ²⁾, Н. Зампаⁱ²⁾, Ф. Кафанья^{h2)}, Д. Кампана^{e2)}, Р. Карбоне^{e,l2)},
 П. Карлсон^{m2)}, М. Казолино^{k2)}, Д. Кастеллиниⁿ²⁾, А. Н. Квашнин^f, С. В. Колдашов^a, С. А. Колдобский^a, С.
 Ю. Крутьков^j, А. А. Леонов^a, Л. Марчелли^{k2)}, М. Мартуччи^{k,q2)}, А. Г. Майоров^a, В. В. Малахов^a, В. Менн^{p2)},
 М. Мерге^{k,l2)}, В. В. Михайлов^a, Э. Мокьюттиⁱ²⁾, А. Монако^{h2)}, Н. Мори^{b,c2)}, Р. Мунини^{i,o2)}, Дж. Остерия^{e2)},
 Ф. Пальма^{k,l2)}, Б. Панико^{e2)}, П. Папини^{c2)}, М. Пирс^{m2)}, П. Пикоцца^{k,l2)}, М. Риччи^a, С. Риччиарини^c,
 М. Л. Розетто^{m,2)}, М. Симон^{p2)}, Р. Саркарⁱ²⁾, В. Скотти^{d,e2)}, Р. Спарволи^{k,l2)}, П. Спилантини^{b,c2)},
 В. Формато^{i,o2)}, Ю. Т. Юркин^a

^aНациональный исследовательский ядерный университет МИФИ, 115409 Москва, Россия

^bUniversity of Florence, I-50019 Sesto Fiorentino, Florence, Italy

^cINFN, Sezione di Florence, I-50019 Sesto Fiorentino, Florence, Italy

^dUniversity of Naples “Federico II”, I-80126 Naples, Italy

^eINFN, Sezione di Naples, I-80126 Naples, Italy

^fФИАН им. Лебедева, 119991 Москва, Россия

^gUniversity of Bari, I-70126 Bari, Italy

^hINFN, Sezione di Bari, I-70126 Bari, Italy

ⁱINFN, Sezione di Trieste, I-34149 Trieste, Italy

^jФТИ им. Иоффе, 194021 С.-Петербург, Россия

^kINFN, Sezione di Rome “Tor Vergata”, I-00133 Rome, Italy

^lUniversity of Rome “Tor Vergata”, I-00133 Rome, Italy

^mKTH, Department of Physics, and the Oskar Klein Centre for Cosmoparticle Physics AlbaNova University Centre, SE-10691 Stockholm, Sweden

ⁿIFAC, I-50019 Sesto Fiorentino, Florence, Italy

^oUniversity of Trieste, I-34147 Trieste, Italy

^pUniversity of Siegen, D-57068 Siegen, Germany

^qINFN, Laboratori Nazionali di Frascati, I-00044 Frascati, Italy

Поступила в редакцию 22 декабря 2014 г.

С помощью калориметра, входящего в состав экспериментального комплекса спутникового эксперимента ПАМЕЛА, находящегося на орбите с июня 2006 г. по сегодняшний день, зарегистрировано изменение отношения интенсивностей частиц космического излучения высоких энергий, приходящих с севера и юга в период 2010–2014 гг. На часть данного периода времени пришлось изменение полярности магнитного поля Солнца. Таким образом, полученные результаты позволяют сделать выводы о связи северно-южной асимметрии потоков частиц космических лучей с магнитным полем Солнца.

DOI: 10.7868/S0370274X15040037

¹⁾e-mail: karelin@hotmail.ru

²⁾О. Адриани, Г.С. Барбарино, Р. Беллотти, М. Боецио, М. Бонджи, В. Бонвичини, С. Боттаи, А. Бруно, Ф. Кафagna, Д. Кампана, Р. Карлсон, М. Казолино, Г. Кастеллини, С. Де Донато, С. Де Сантис, Н. Де Симоне, В. Ди Феличе, В. Формато, Л. Марцелли,

М. Martucci, W. Menn, M. Merge', E. Mocchiutti, A. Monaco, N. Mori, R. Munini, G. Osteria, F. Palma, B. Panico, P. Papini, M. Pearce, P. Picozza, M. Ricci, M.L. Rosetto, S.B. Ricciarini, R. Sarkar, V. Scotti, M. Simon, R. Sparvoli, P. Spillantini, A. Vacchi, E. Vannuccini, G. Zampa, N. Zampa

В предыдущей работе [1] по данным спутникового эксперимента ПАМЕЛА за период 06.2006–08.2009 была зарегистрирована северно-южная асимметрия частиц космического излучения. О асимметрии потоков частиц космического излучения с северного и южного направлений в то же время свидетельствовал и ряд других измерений, выполненных с помощью нейтронных мониторов и на баллонах в верхних слоях атмосферы [2–4]. При этом величина асимметрии составляла около 3% для частиц с энергией порядка 10 ГэВ и уменьшалась с ростом энергии. Одно из возможных объяснений этому факту было дано в ряде теоретических работ [5, 6]. В них было показано, что различие интенсивностей может быть связано с распространением космических лучей через разные части гелиосферы. Чтобы проверить гипотезу о связи наблюдаемой асимметрии с солнечным магнитным полем, в эксперименте ПАМЕЛА были проведены дополнительные измерения в период с 24.02.2010 по 31.07.2014. Данный период включает в себя временной интервал, в течение которого происходила смена полярности магнитного поля Солнца. Ожидалось, что такой глобальный процесс будет оказывать влияние на величину эффекта асимметрии.

Экспериментальный комплекс ПАМЕЛА в составе космического аппарата Ресурс ДК1 был выведен на орбиту Земли в июне 2006 г. Он находится в активном состоянии и по сегодняшний день. Орбита спутника – эллиптическая с наклоном 70.4° и высотой 350–650 км до ноября 2010 и 510–610 км после. Основная задача эксперимента ПАМЕЛА – изучение состава и энергетических спектров частиц космического излучения в широком диапазоне энергий. Прибор ПАМЕЛА состоит из нескольких детекторов: системы времени пролета с тремя двойными плоскостями сцинтилляторов, магнитного спектрометра с системой координатных кремниевых детекторов, электромагнитного калориметра, нижнего ливневого сцинтилляционного детектора С4, детектора нейтронов и счетчиков системы антисовпадений. Геометрический фактор для высокоэнергичных частиц (> 1 ГэВ), проходящих в пределах чувствительного объема магнитного спектрометра, равен $21.6 \text{ см}^2 \text{ ср}$, что соответствует угловой апертуре $19^\circ \times 16^\circ$. Эта апертура служит основной апертурой прибора. Одной из возможностей прибора является расширение угловой апертуры с помощью триггеров, вырабатываемых позиционно-чувствительным калориметром и нижним сцинтилляционным детектором С4. Это позволяет существенно увеличить статистику для регистрируемых частиц высоких энергий. Триггеры вырабатываются при условии превышения

энерговыведением внутри калориметра или С4 пороговых величин, которые соответствуют возникновению в калориметре мощного каскада вторичных частиц при взаимодействии падающих частиц с его веществом. С помощью разработанной методики восстановления направления прилета частиц в калориметр, речь о которой пойдет ниже, возможно определять траекторию первичной частицы по оси каскада, развившегося в калориметре, до углов к вертикали $\sim 75^\circ$. При этом апертура прибора становится в десятки раз больше основной, что дает возможность увеличить объем зарегистрированных высокоэнергетичных частиц. В дальнейшем будем называть расширенную таким образом апертуру широкой апертурой. Калориметр состоит из 22 слоев. Каждый слой образован двумя плоскостями кремниевых стриповых детекторов и пластиной из вольфрама толщиной 2.3 мм. Каждая плоскость кремниевых детекторов включает в себя 96 стрипов с шагом 2.2 мм. Стрипы в соседних плоскостях расположены ортогонально друг другу, что позволяет измерять пространственное распределение вторичных частиц в калориметре в двух проекциях. Суммарная толщина калориметра составляет 0.6 ядерной длины взаимодействия (17 рад. длин). Подробное описание калориметра прибора ПАМЕЛА приведено в работе [7].

Предметом анализа служили события, в которых частицы приходили в широкой апертуре. Основным критерием для первоначального отбора является пороговая величина полного энерговыведения в калориметре. Последнее измеряется в единицах “мип” – энерговыведении, регистрируемом при прохождении одной минимально ионизирующей частицы в одном слое детекторов. Этот критерий позволяет выделять частицы высоких энергий, испытавшие взаимодействие в калориметре. Фиксированная величина полного энерговыведения в калориметре соответствует различным первоначальным энергиям для ядер, электронов и протонов. Расчет показал, что конкретно выбранное энерговыведение, отвечающее некоторой величине первоначальной энергии электронов, согласуется с в несколько раз большей кинетической энергией протонов. В отобранных по данному критерию событиях преобладают протоны и ядра гелия в соответствии с их подавляющим содержанием в космических лучах (около 90% протонов, около 10% ядер гелия, на остальные частицы приходится менее 1%). Вместе с тем, поскольку низкоэнергичные тяжелые ядра дают во много раз большее, чем протоны и ядра гелия, энерговыведение, то их доля в отобранных событиях значительно возрастает. Так, при пороге в 4000 мип относительное количество регистри-

руемых частиц примерно таково: 5 % низкоэнергетичных тяжелых ядер, 55 % протонов с энергией выше 20 ГэВ, 15 % ядер гелия с энергией выше 10 ГэВ/н, 25 % электронов с энергией выше 7 ГэВ. Для определения направления оси ливня в калориметре был использован итерационный подход, основанный на методе наименьших квадратов [8]. Направление первичной частицы совпадает с осью ливня в калориметре. Из отобранных событий рассматривались только зарегистрированные в то время, когда спутник находился в области выше 60° северной широты и ниже 60° южной широты в географической системе координат, а сами частицы приходили в прибор с направлений не меньше 60° и -60° в той же системе координат. Таким образом отбирались частицы, приходящие с северных и южных направлений.

Порядковый номер временного интервала	Период времени (ч.м.г.)
1	24.02.10-02.04.10; 10.05.28; 17.06.17-20.06.10; 16.11.10; 19.11.00-05.01.11
2	06.01.11-07.04.11
3	08.04.11-06.07.11
4	08.07.11-02.08.11; 05.09.11- 20.09.11; 17.10.11-02.12.11
5	03.12.11-01.03.12
6	02.03.12-11.04.12; 10.05.12- 27.06.12;
7	28.06.12-24.07.12; 16.08.12- 19.10.12;
8	20.10.12-27.01.13
9	28.01.13-27.04.13
10	28.04.13-26.07.13
11	27.07.13-28.10.13
12	29.10.13-29.01.14
13	30.01.14-30.04.14
14	01.05.01-31.07.14

Для характеристики асимметрии была использована величина $(N_s - N_n)/(N_n + N_s)$, где N_s – темп счета отобранных согласно описанной выше процедуре событий со стороны Северного магнитного полюса Земли, а N_n со стороны Южного. Изменение величины $(N_s - N_n)/(N_n + N_s)$ со временем при пороге 4000 мип продемонстрировано на рис. 1. Время отсчитывается с 24 февраля 2010 г. В таблице приведены временные интервалы, соответствующие каждой точке. Пропуски во времени связаны с исключением из рассмотрения временных интервалов с измененным режимом работы прибора. Один временной интервал равен полным 90

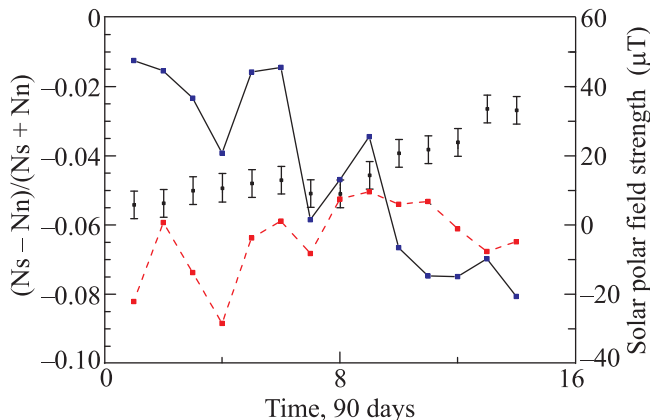


Рис. 1. Изменение величины $(N_s - N_n)/(N_s + N_n)$ со временем. Один временной интервал включает полные 90 дней наблюдений. Сплошной линией отмечена индукция южного, а штриховой – северного полярного магнитного поля Солнца (по данным обсерватории Уилкоккс при Стэнфордском университете). Порог полного энерговыделения в калориметре для отбора равен 4000 мип

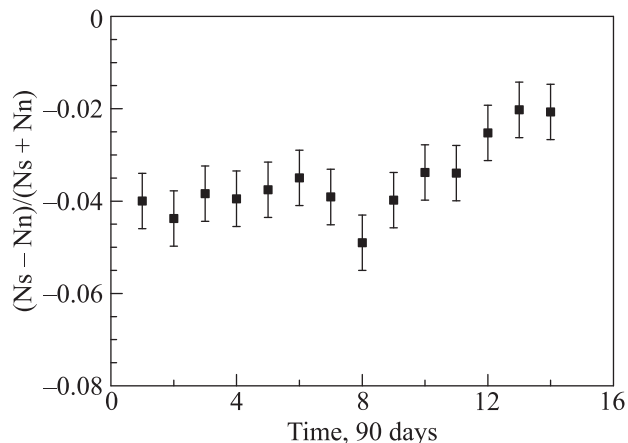


Рис. 2. Изменение величины $(N_s - N_n)/(N_s + N_n)$ со временем. Один временной интервал включает полные 90 дней наблюдений. Порог полного энерговыделения в калориметре для отбора равен 10000 мип

дням работы. Также на рис.1 показана динамика полярного магнитного поля Солнца в его северном и южном полушариях (информация взята с сайта <http://www.stanford.edu/polar.html> обсерватории Уилкоккс при Стэнфордском университете). Для 90-дневного интервала значения были усреднены. До восьмой точки темп счета на Южном магнитном полюсе Земли выше, чем на Северном. Далее, начиная с восьмой точки, наблюдается уменьшение рассматриваемого отношения. Восьмая точка, как это видно из таблицы, соответствует временному интервалу 20.10.12-27.01.13. Согласно данным обсер-

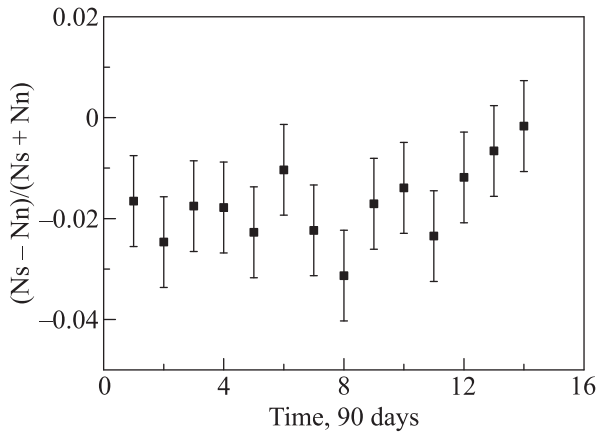


Рис. 3. Изменение величины $(N_s - N_n)/(N_s + N_n)$ со временем. Один временной интервал включает полные 90 дней наблюдений. Порог полного энерговыделения в калориметре для отбора равен 20000 мип

ватории Уилкоккс в июне 2012 г. произошло изменение северной полярности Солнца. На рис. 2 и 3 также показано поведение величины $(N_s - N_n)/(N_n + N_s)$, но для более высоких порогов: 10000 и 20000 мип соответственно. Повышенный порог означает более высокие значения энергии частиц и уменьшение доли тяжелых ядер. Как и ожидалось, с ростом порога отношение $(N_s - N_n)/(N_n + N_s)$ стремится к нулевому значению.

Таким образом, рассматриваемое отношение начинает расти в период 20.10.12–27.01.13, когда впервые за данный солнечный цикл произошло перенаправление северного магнитного полюса Солнца. Это свидетельствует о корреляции асимметрии потоков частиц космического излучения в направлениях север–юг с солнечным магнитным полем.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант # 14-12-00373) и Гранта Президента Российской Федерации для поддержки молодых ученых # МК-4599.2014.2.

1. А. В. Карелин, О. Адриани, Дж. Барбарино, Г. А. Базилевская, Р. Белотти, М. Боецио, Э. А. Богомолов, Л. Бонеки, М. Бонджи, В. Бонвичини, С. Боттаи, А. Бруно, А. Вакки, Е. Ваннучини, Г. И. Васильев,

С. А. Воронов, А. М. Гальпер, К. Де Донато, К. Де Сантис, Н. Де Симоне, В. Де Феличе, В. Г. Зверев, Дж. Зампа, Н. Зампа, Ф. Кафанья, Д. Кампана, Р. Карбоне, П. Карлсон, М. Казолино, Д. Кастеллини, А. Н. Квашнин, С. В. Колдашов, С. А. Колдобский, С. Ю. Крутьков, А. А. Леонов, В. Мальвецци, Л. Марчелли, М. Маргучи, А. Г. Майоров, В. В. Малахов, В. Менн, М. Мерге, В. В. Михайлов, Э. Мокьютти, А. Монако, Н. Мори, Дж. Остерия, Ф. Пальма, П. Папини, М. Пирс, П. Пикоцца, Ч. Пиззолотто, М. Риччи, С. Риччиарини, М. Симон, Р. Саркар, Р. Спарволи, П. Спилантини, Ю. И. Стожков, Ю. Т. Юркин, *ЖЭТФ* **146**(3), 312 (2013); A. V. Karelin, O. Adriani, G. C. Barbarino, G. A. Bazilevskaia, R. Bellotti, M. Boezio, E. A. Bogomolov, L. Bonechi, M. Bongi, V. Bonvicini, S. Bottai, A. Bruno, A. Vacchi, E. Vannuccini, G. I. Vasilyev, S. A. Voronov, A. M. Galper, I. A. Danilchenko, C. De Donato, C. De Santis, N. De Simone, V. Di Felice, V. G. Zverev, G. Zampa, N. Zampa, F. Cafagna, D. Campana, R. Carbone, P. Carlson, M. Casolino, G. Castellini, A. N. Kvashnin, S. V. Koldashov, S. A. Koldobskiy, S. Y. Krutkov, A. A. Leonov, V. Malvezzi, L. Marcelli, M. Martucci, A. G. Mayorov, V. V. Malakhov, W. Menn, M. Merge, V. V. Mikhailov, E. Mocchiutti, A. Monaco, N. Mori, G. Osteria, F. Palma, P. Papini, M. Pearce, P. Picozza, C. Pizzolotto, M. Ricci, S. B. Ricciarini, M. F. Runtso, R. Sarkar, M. Simon, R. Sparvoli, P. Spillantini, and Y. T. Yurkin, *JETP* **117**(2), 268 (2013).

2. Г. Ф. Крымский, П. А. Кривошапкин, В. П. Мамрукова, Г. В. Скрипин, *Геомагнетизм и аэрономия* **21**(5), 923 (1981).
3. M. A. Shea and D. F., *Smart, Ital. di Fisica, Bologna, Italy* 398 (1988).
4. Y. I. Stozhkov, G. A. Bazilevskaia, P. E. Pokrevsky, N. S. Svirzhevsky, I. M. Martin, and A. Turtelli, *J. Geophys. Res. A* **101**, 2523 (1996).
5. J. Chen, J. W. Bieber, and M. A. Pomerantz, *Geophys. Res. Res.* **96**, 569 (1991).
6. D. B. Swinson, M. A. Shea, and J. E. Humble, *Geophys. Res. Res.* **91**, 2943 (1986).
7. M. Boezio, V. Bonvicini, E. Mocchiutti, P. Schiavon, G. Scian, A. Vacchi, G. Zampa, and N. Zampa, *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A* **487**, 407 (2002).
8. S. V. Borisov, S. A. Voronov, and A. M. Galper, *ПТЭ* **1**, 5 (2013).