

Измерение крупномасштабной анизотропии космических лучей в эксперименте ПАМЕЛА

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^q,
 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

^fФИААН 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 23 января 2015 г.

В исследованиях, проводимых в околоземном космическом пространстве, в спутниковом эксперименте ПАМЕЛА за 2006–2014 гг. была зарегистрирована крупномасштабная анизотропия, или так называемая звездно-суточная волна. Величина анизотропии измерена для южного и северного полушарий одновременно в экваториальной системе координат. Полученные результаты подтверждают данные наземных экспериментов.

DOI: 10.7868/S0370274X15050021

¹⁾e-mail: karelin@hotmail.ru

²⁾O. Adriani, G.C. Barbarino, R. Bellotti, M. Boezio, M. Bongi, V. Bonvicini, S. Bottai, A. Bruno, F. Cafagna, D. Campana, P. Carlson, M. Casolino, G. Castellini, C. De Donato, C. De Santis, N. De Simone, V. Di Felice, V. Formato, L. Marcelli,

M. 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

Исследования вариаций интенсивности галактических космических лучей в зависимости от направления их прихода проводятся довольно давно, с 70–80-х годов прошлого века, например, на установке в штате Юта США [1], на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе [2], а также на Баксанской установке КОВЕР [3]. Однако особенно активное исследование анизотропии космических лучей высоких энергий ведется последние 15 лет. В целом ряде наземных экспериментов в основном в северном полушарии (Супер Камиоканде [4], Тибет [5], Арго [6], Миларго [7], Минос [8]), а также на Ice-Cube [9] в южном было продемонстрировано существование анизотропии на уровне 10^{-3} в интервале энергий от 1 ТэВ до 1 ПэВ. Величины и угловые расположения максимумов и минимумов интенсивностей в этих экспериментах в целом совпадают друг с другом, однако зависят от энергии.

Так как указанная анизотропия носит дипольный характер в экваториальной системе координат, то ее принято называть крупномасштабной дипольной анизотропией (для различия с анизотропиями масштаба других порядков [10]). Природа крупномасштабной анизотропии до сих пор вызывает вопросы. Общепризнанной теории, объясняющей это явление, на сегодняшний день не существует. Есть версии, связывающие эффект анизотропии с близкими источниками, такими, как остатки сверхновых [11], или с пекулярным движением солнечной системы относительно общей массы звезд (так называемый эффект Комптона–Геттинга [12]).

Все вышеупомянутые эксперименты проводились при помощи наземных установок. Поэтому во время измерений использовались поправки для учета эффектов, связанных с атмосферой (например, учитывающие сезонные колебания давления и температуры атмосферы). Кроме того, наземные установки могли регистрировать эффект анизотропии только в одном полушарии, в котором они собственно и располагаются. Поэтому естественным желанием может быть проведение подобных измерений вне атмосферы, причем сразу в двух земных полусферах.

Такие измерения были выполнены при проведении спутникового эксперимента ПАМЕЛА. Магнитный спектрометр ПАМЕЛА предназначен для проведения прецизионных измерений спектров частиц космических лучей в широком интервале энергий. Прибор состоит из следующих детекторов: сцинтилляционной времяпролетной системы ВПС, магнитного спектрометра, системы антисовпадений, электромагнитного калориметра, ливневого сцинтилляционного детектора С4 и нейтронного детектора. Гео-

метрический фактор прибора ПАМЕЛА, определяемый апертурой магнитного спектрометра, составляет $21.6 \text{ см}^2 \text{ ср}$. Подробное описание как всего прибора ПАМЕЛА в целом, так и его отдельных детекторов и условий проведено измерений приведены в работе [13].

Для увеличения геометрического фактора с целью повышения уровня статистической достоверности результатов использовались комбинированные данные калориметра и детектора С4, вырабатывающего свой собственный триггерный сигнал наряду с калориметром при превышении установленной величины энерговыделения.

Калориметр [14] состоит из 44 плоскостей кремниевых стриповых детекторов, между которыми расположены 22 пластины из вольфрама толщиной 2.6 мм каждая. Одна плоскость детекторов включает в себя в сумме 96 стрипов с шагом 2.2 мм. Это дает возможность измерять координаты частиц в двух проекциях и получать таким образом пространственное распределение вторичных частиц каскада, развившегося в калориметре при взаимодействии с его веществом регистрируемой частицы. Суммарная толщина калориметра составляет 0.6 ядерной длины взаимодействия, или 17 радиационных длин.

Направление прилета частиц определялось по измерению оси ливня, генерируемого частицей в калориметре [15]. Ось ливня совпадает с направлением первичной частицы. Таким образом, главным условием отбора событий было наличие развитого каскада вторичных частиц с осью ливня, находящейся внутри калориметра. Каскады вторичных частиц рождаются не только электронами, но также и протонами и более тяжелыми ядрами, причем с разной вероятностью в зависимости от типа взаимодействовавшей частицы при заданной кинетической энергии. Суммарная величина зарегистрированного полного энерговыделения в калориметре зависит от энергии первичной частицы. В космических лучах преобладают протоны – (около 90 %) и ядра гелия – (около 9 %). При этом на все остальные частицы (электроны и тяжелые ядра) приходится около 1 %. Однако если фиксировать в отобранных событиях величину полного энерговыделения в калориметре, то количественное соотношение типов частиц среди них будет другим. Это связано с тем, что, как отмечено выше, частицы разных типов рождают ливни с разной вероятностью при заданной первичной энергии. Чтобы избавиться от частиц низких энергий, подверженных влиянию магнитного поля Земли, был повышен порог для отбора событий по полному энерговыделению в калориметре. Порог повышался

до тех пор, пока влиянием указанных частиц на конечное угловое распределение не становилось можно полностью пренебречь. В результате был установлен порог в 180000 мип. Один мип равен энергии, которая выделяется в одной плоскости калориметра при прохождении одной минимально ионизирующей частицы.

Для исследования анизотропии была построена изотропная фоновая карта в экваториальной системе координат, с которой затем сравнивается полученная экспериментальная карта. Идея метода создания “изотропной” карты для последующего поиска анизотропии состоит в том, чтобы случайным образом перераспределить восстановленные направления внутри приборной системы координат в отобранном наборе экспериментальных данных [16].

В случае идеального изотропного распределения по направлениям потоков космических лучей интенсивность, не зависящая от времени, будет одной и той же для всех направлений в пространстве. Возможные временные изменения интенсивности будут обусловлены только приборными эффектами, например включениями-выключениями прибора в течение времени измерения. Таким образом, можно промоделировать набор изотропно распределенных событий, используя только экспериментальные данные, случайным образом меняя направления прилета частиц в системе координат, связанной с прибором. Так, берется восстановленное направление частицы относительно системы координат прибора ПАМЕЛА в одном событии, а затем оно обменивается с измеренным направлением в другом событии. Многократное повторение данной процедуры с нормальным распределением вероятности выбора событий для обмена направлений внутри приборной системы координат позволяет смоделировать “изотропную” фоновую карту с учетом реального энергетического спектра, реальной эффективности регистрации и мертвого времени, соответствующих реальным экспериментальным данным. Для получения изотропной карты для событий с энерговыделением выше 180000 мип с целью повышения статистической достоверности процедура повторялась сто раз.

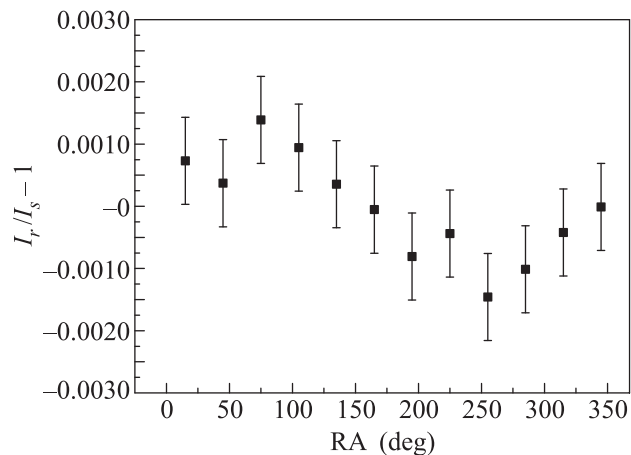
В случае дипольной анизотропии относительная интенсивность космических лучей $\frac{I_r - I_s}{I_s}$, где I_s – величина интенсивности потока частиц из изотропной фоновой карты в данном направлении, а I_r – измеренная интенсивность, в первом приближении может быть представлена в виде [17]

$$\frac{I_r - I_s}{I_s} = i_0 \cos \theta, \quad (1)$$

где θ – угол между направлением прилета регистрируемой частицы и направлением максимума анизотропии, i_0 – амплитуда интенсивности дипольной анизотропии.

Учитывая малую величину ожидаемой анизотропии, которая составляет порядка 10^{-3} , и недостаточный объем статистики, трехмерную карту распределения по двум координатам (прямому восхождению и склонению) не строили. Была построена только двумерная карта зависимости величины $\frac{I_r - I_s}{I_s}$ от прямого восхождения.

Из-за все того же недостаточного объема статистики карта строилась следующим образом. Область значений углов прямого восхождения ($0^\circ - 360^\circ$) разбивалась на два равных интервала. Для каждого интервала вычислялась величина $\frac{I_r - I_s}{I_s}$. Затем происходило смещение центров интервалов и величина $\frac{I_r - I_s}{I_s}$ вычислялась снова. Смещение центра интервалов осуществлялось в диапазоне от 0 до 360 градусов с шагом в 5° . Таким образом, получилось 72 значения $\frac{I_r - I_s}{I_s}$. Окончательно величина $\frac{I_r - I_s}{I_s}$ усреднялась по 6 значениям в соседних интервалах. Описанный метод схож с анализом, используемым в пакете программ HEALPix [18], созданном для работы с данными в сферических системах координат. В итоге удалось существенно повысить статистическую значимость полученного результата, (см. рисунок). Каждая точка включает в себя около 1600000



Изменение относительной интенсивности космических лучей в зависимости от прямого восхождения ($0^\circ - 360^\circ$) по данным эксперимента ПАМЕЛА

событий. Энергия отобранных событий лежит в интервале 1–20 ТэВ.

Согласно (1) представленная на рисунке зависимость была аппроксимирована выражением вида

$$Y = Y_0 + A \sin \left(\pi \frac{X - X_c}{w} \right), \quad (2)$$

где Y_0 , A , X_c , w – параметры аппроксимации. При этом амплитуда относительной интенсивности A оказалась равной $A = 0.0011 \pm 0.0001$.

Найденные положения максимума и минимума, а также величины амплитуд колебаний хорошо совпадают с результатами наземных измерений (амплитуда порядка 0.1 % при энергиях $10^{12} - 10^{13}$ эВ [1–9], максимум прямого восхождения в районе около 100° , минимум около 250°).

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. D. J. Gutler, H. E. Bergeson, J. E. Davis, and D. E. Groom, *Astrophys. J.* **248**, 1166 (1981).
2. А. С. Лидванский, В. А. Козыревский, В. Я. Поддубный, А. М. Сидоренко, Т. И. Тулупова, А. Е. Чудаков, *Изв. АН, сер. физ.* **59** 200 (1995).
3. В. В. Алексеенко, Е. Н. Гулиева, В. Г. Сборщиков, *Изв. АН* **18**, 2126 (1984).
4. G. Guillian, J. Hosaka, and K. Ishihara, *29th International Cosmic Ray Conference*, Pune, India (2005), v. 6, p. 85.
5. M. Amenomori, S. Ayabe, and S. W. Cui, *Astrophys. J.* **626**, 29 (2005).
6. G. Di Sciacio and R. Iuppa, *J. Phys.: Conf. Ser.* **375** 052008 (2012).
7. A. A. Abdo, B. T. Allen, T. Aune, D. Berley, S. Casanova, C. Chen, B. L. Dingus, R. W. Ellsworth, L. Fleysler, R. Fleysler, M. M. Gonzalez, J. A. Goodman, C. M. Hoffman, B. Hopper, P. H. Hüntemeyer, B. E. Kolterman, C. P. Lansdell, J. T. Linnemann, J. E. McEnery, A. I. Mincer, P. Nemethy, D. Noyes, J. Pretz, J. M. Ryan, P. M. Saz Parkinson, A. Shoup, G. Sinnis, A. J. Smith, G. W. Sullivan, V. Vasileiou, G. P. Walker, D. A. Williams, and G. B. Yodh, *Astrophys. J.* **698**, 2121 (2009).
8. J. K. de Jong, *Proc. 32nd ICRC*, Beijing, China (2011).
9. R. Abbasi, Y. Abdou, T. Abu-Zayyad, J. Adams, J. A. Aguilar, M. Ahlers, D. Altmann, K. Andeen, J. Auffenberg, X. Bai, M. Baker, S. W. Barwick, R. Bay, J. L. Bazo Alba, K. Beattie, J. J. Beatty, S. Bechet, J. K. Becker, K.-H. Becker, M. L. Benabderrahmane, S. BenZvi, J. Berdermann, P. Berghaus, D. Berley, E. Bernardini, D. Bertrand, D. Z. Besson, D. Bindig, M. Bissok, E. Blaufuss, J. Blumenthal, D. J. Boersma, C. Bohm, D. Bose, S. Böser, O. Botner, A. M. Brown, S. Buitink, K. S. Caballero-Mora, M. Carson, D. Chirkin, B. Christy, J. Clem, F. Clevermann, S. Cohen, C. Colnard, D. F. Cowen, M. V. D'Agostino, M. Danninger, J. Daughhetee, J. C. Davis, C. De Clercq, L. Demirörs, T. Denger, O. Depaeppe, F. Descamps, P. Desiati, G. de Vries-Uiterweerd, T. DeYoung, J. C. Diaz-Vélez, M. Dierckxsens, J. Dreyer, J. P. Dumm, R. Ehrlich, J. Eisch, R. W. Ellsworth, O. Engdegård, S. Euler, P. A. Evenson, O. Fadiran, A. R. Fazely, A. Fedynitch, J. Feintzeig, T. Feusels, K. Filimonov, C. Finley, T. Fischer-Wasels, M. M. Foerster, B. D. Fox, A. Franckowiak, R. Franke, T. K. Gaisser, J. Gallagher, L. Gerhardt, L. Gladstone, T. Glüsenskamp, A. Goldschmidt, J. A. Goodman, D. Gora, D. Grant, T. Griesel, A. Groß, S. Grullon, M. Gurtner, C. Ha, A. Hajismail, A. Hallgren, F. Halzen, K. Han, K. Hanson, D. Heinen, K. Helbing, P. Herquet, S. Hickford, G. C. Hill, K. D. Hoffman, A. Homeier, K. Hoshina, D. Hubert, W. Huelsnitz, J.-P. Hülß, P. O. Hulth, K. Hultqvist, S. Hussain, A. Ishihara, J. Jacobsen, G. S. Japaridze, H. Johansson, J. M. Joseph, K.-H. Kampert, A. Kappes, T. Karg, A. Karle, P. Kenny, J. Kiryluk, F. Kislak, S. R. Klein, J.-H. Köhne, G. Kohnen, H. Kolanoski, L. Köpke, S. Kopper, D. J. Koskinen, M. Kowalski, T. Kowarik, M. Krasberg, T. Krings, G. Kroll, N. Kurahashi, T. Kuwabara, M. Labare, S. Lafebre, K. Laihem, H. Landsman, M. J. Larson, R. Lauer, J. Lünemann, B. Madajczyk, J. Madsen, and P. Majumda, *Astrophys. J.* **740**, 16 (2011).
10. A. U. Abeysekara, R. Alfaro, C. Alvarez, J. D. Álvarez, R. Arceo, J. C. Arteaga-Velázquez, H. A. Ayala Solares, A. S. Barber, B. M. Baughman, N. Bautista-Elivar, E. Belmont, S. Y. BenZvi, D. Berley, M. Bonilla Rosales, J. Braun, K. S. Caballero-Mora, A. Carramiñana, M. Castillo, U. Cotti, J. Cotzomi, E. de la Fuente, C. De León, T. DeYoung, R. Diaz Hernandez, J. C. Díaz-Vélez, B. L. Dingus, M. A. DuVernois, R. W. Ellsworth, D. W. Fiorino, N. Fraija, A. Galindo, F. Garfias, M. M. González, J. A. Goodman, M. Gussert, Z. Hampel-Arias, J. P. Harding, P. Hüntemeyer, C. M. Hui, A. Imran, A. Iriarte, P. Karn, D. Kieda, G. J. Kunde, A. Lara, R. J. Lauer, W. H. Lee, D. Lennarz, H. Leyn Vargas, J. T. Linnemann, M. Longo, R. Luna-García, K. Malone, A. Marinelli, S. S. Marinelli, H. Martinez, O. Martinez, J. Martinez-Castro, J. A. J. Matthews, J. McEnery, E. Mendoza Torres, P. Miranda-Romagnoli, E. Moreno, M. Mostafá, L. Nellen, M. Newbold, R. Noriega-Papaqui, T. Oceguera-Becerra, B. Patricelli, R. Pelayo, E. G. Pérez-Pérez, J. Pretz, C. Rivière, D. Rosa-González, E. Ruiz-Velasco, J. Ryan, H. Salazar, F. Salesa Greus, A. Sandoval, M. Schneider, G. Sinnis, A. J. Smith, K. Sparks Woodle, R. W. Springer, I. Taboada, P. A. Toale, K. Tollefson, I. Torres,

- T.N. Ukwatta, L. Villaseñor, T. Weisgarber, S. Westerhoff, I.G. Wisher, J. Wood, G.B. Yodh, P.W. Young, D. Zaborov, A. Zepeda, and H. Zhou, *Astrophys. J.* **796**, 108 (2014).
11. A.D. Erlykin and A.W. Wolfendale, *Astropart. Phys.* **25**, 183 (2006).
12. A.H. Compton and I.A. Getting, *Phys. Rev.* **47**, 817 (1935).
13. O. Adriani, G.C. Barbarino, G.A. Bazilevskaya, R. Bellotti, M. Boezio, E.A. Bogomolov, M. Bongi, V. Bonvicini, S. Bottai, A. Bruno, F. Cafagna, D. Campana, R. Carbone, P. Carlson, M. Casolino, G. Castellini, M.P. De Pascale, C. De Santis, N. De Simone, V. Di Felice, V. Formato, A.M. Galper, U. Giaccari, A.V. Karelin, M.D. Kheymits, S.V. Koldashov, S. Koldobskiy, S.Yu. Krut'kov, A.N. Kvashnin, A. Leonov, V. Malakhov, L. Marcelli, M. Martucci, A.G. Mayorov, W. Menn, V.V. Mikhailov, E. Mocchiutti, A. Monaco, N. Mori, R. Munini, N. Nikonov, G. Osteria, P. Papini, M. Pearce, P. Picozza, C. Pizzolotto, M. Ricci, S.B. Ricciarini, L. Rossetto, R. Sarkar, M. Simon, R. Sparvoli, P. Spillantini, Y.I. Stozhkov, A. Vacchi, E. Vannuccini, G.I. Vasilyev, S.A. Voronov, J. Wu, Y.T. Yurkin, G. Zampa, N. Zampa, and V.G. Zverev, *Phys. Rep.* **544**, 323 (2014).
14. 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).
15. С.В. Борисов, С.А. Воронов, А.М. Гальпер, А.В. Карелин, *ПТЭ* **1**, 5 (2013).
16. A.V. Karelin, O. Adriani, G.C. Barbarino, G.A. Bazilevskaya, R. Bellotti, M. Boezio, E.A. Bogomolov, L. Bonechi, M. Bongi, V. Bonvicini, S.V. Borisov, S. Bottai, A. Bruno, F. Cafagna, D. Campana, R. Carbone, P. Carlson, M. Casolino, G. Castellini, L. Consiglio, M.P. De Pascale, C. De Santis, N. De Simone, V. Di Felice, A.M. Galper, W. Gillard, G. Jerse, M.D. Kheymits, S.V. Koldashov, S.A. Koldobskiy, S.Y. Krutkov, A.N. Kvashnin, A.A. Leonov, A.G. Mayorov, V.V. Malakhov, L. Marcelli, W. Menn, V.V. Mikhailov, E. Mocchiutti, A. Monaco, N. Mori, N. Nikonov, G. Osteria, F. Palma, P. Papini, M. Pearce, P. Picozza, C. Pizzolotto, M. Ricci, S.B. Ricciarini, R. Sarkar, L. Rossetto, M. Simon, R. Sparvoli, P. Spillantini, Y.I. Stozhkov, A. Vacchi, E. Vannuccini, G.I. Vasilyev, S.A. Voronov, J. Wu, Y.T. Yurkin, G. Zampa, N. Zampa, and V.G. Zverev, *J. Phys.: Conf. Ser.* **409**, 012029 (2013).
17. В.С. Березинский, С.В. Буланов, В.А. Догель, В.Л. Гинзбург, В.А. Птускин, *Астрофизика космических лучей*, Физматлит, М. (1990).
18. K.M. Gorski, E. Hivon, A.J. Banday, B.D. Wandelt, F.K. Hansen, M. Reinecke, and M. Bartelmann, *Astrophys. J.* **622**, 759 (2005).