

УДК 539.171

РАЗДЕЛЕНИЕ ГРУПП ЯДЕР ПКЛ С ЭНЕРГИЯМИ 10^{15} – 10^{16} эВ С ПОМОЩЬЮ ПРОСТРАНСТВЕННО-УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧЕРЕНКОВСКОГО СВЕТА ШАЛ

© 2011 г. В. И. Галкин^{1,2}, Т. А. Джатдоев^{1,2}

E-mail: v_i_galkin@rambler.ru

Предложены многомерные байесовы критерии разделения групп ядер первичных космических лучей, основанные на характеристиках пространственно-углового распределения черенковского света широких атмосферных ливней. Эти критерии позволяют, в принципе, выделять не менее 50–60% первичных протонов из массы более тяжелых ядер; при этом ошибки классификации первичных протонов, групп ядер азота и железа составляют не более нескольких процентов. Кроме того, найдены новые параметры угловых образов черенковского света, которые существенно улучшают разделимость классов ливней.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема ядерного состава первичных космических лучей (ПКЛ) сверхвысоких энергий ($>10^{15}$ эВ) в настоящее время далека от окончательного решения. Как в области излома спектра – “колена” (10^{15} – 10^{16} эВ) [1–6], так и при более высоких энергиях “второго колена” (10^{17} – 10^{18} эВ) [7, 8] и, наконец, в области предельно высоких энергий (10^{19} – 10^{20} эВ) [9, 10] не только не получены надежные данные о форме парциальных спектров различных групп ядер ПКЛ, но даже не существует общепризнанного результата для зависимости среднего массового числа ПКЛ от энергии. Между тем именно предсказания ядерного состава ПКЛ часто являются наиболее яркими отличительными признаками различных моделей ускорения и распространения космических лучей сверхвысоких энергий [7, 8, 11], поэтому поиск причин расхождения результатов различных экспериментальных групп выглядит особенно актуальным.

Имеются существенные различия между результатами измерений, проведенных близкими методами, например значениями среднего массового числа $\langle A \rangle$ по данным об электронно-мюонной компоненте ливня [1, 2] и результатами нескольких черенковских установок [3–6]. Разница $\langle A \rangle$, измеренных различными черенковскими установками, существенно превышает расхождения между группами, работающими по заряженной компоненте ливня.

Настоящая работа продолжает исследование чувствительности характеристик ЧС ШАЛ к массовому составу, направленное на разработку критериев индивидуальной классификации ливней, инициированных ядрами ПКЛ с различным массовым числом. Для построения методики разделения групп ядер ПКЛ используется пространственно-угловое распределение (ПУР) ЧС ШАЛ – одна из самых информативных характеристик ливня. Предыдущие работы, исследовавшие ПУР ЧС ШАЛ, продемонстрировали умеренную разрешающую способность по массовому числу [12], сравнимую с разрешающей способностью критериев, основанных только на поперечном распределении черенковского света [13, 14], т.е. не выявили специфических преимуществ ПУР ЧС ШАЛ.

1. МЕТОДИКА РАСЧЕТА И КЛАССИФИКАЦИИ

Выборка искусственных ЧС ШАЛ, использованных в настоящей работе, была рассчитана с помощью кода CORSIKA 6.500 [15] по модели ядерного взаимодействия QGSJET-II [16]/GHEISHA [17] путем полного статистического моделирования. Детали процедуры моделирования приведены в [18]. Объем выборки составил 500 событий, первичная энергия всех событий – 1 ПэВ, из них 250 событий соответствуют высоте поверхности наблюдения 1 км над уровнем моря, а остальные 250 событий – высоте 4 км. Для этих высот было рассчитано по 50 событий от первичных протонов, а также ядер гелия, азота и железа. Для случая уровня наблюдения 1 км также имеется 50 ливней, инициированных ядрами серы, а для случая 4 км – 50 событий от ядер кальция.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова.

² Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таблица 1. Результаты многомерной классификации для случая первичной энергии 1 ПэВ и уровней наблюдения 1 км (слева) и 4 км (справа)

	p	h	n	s	f		p	h	n	c	f
p	0.74	0.26	0.00	0.00	0.00	p	0.70	0.28	0.02	0.00	0.00
h	0.02	0.90	0.06	0.02	0.00	h	0.00	0.94	0.06	0.00	0.00
n	0.00	0.06	0.92	0.02	0.00	n	0.00	0.06	0.92	0.00	0.02
s	0.00	0.00	0.04	0.90	0.06	c	0.00	0.00	0.00	0.92	0.08
f	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	f	0.00	0.00	0.00	0.14	0.86

Для разделения групп ядер необходимо определить так называемый вектор признаков, состоящий из характеристик ПУР ЧС ШАЛ, который затем подается на вход процедуры классификации. Наиболее традиционный подход [12] состоит в том, что пятно углового распределения ЧС ШАЛ характеризуется величинами [19, 20]: D (угловое расстояние от направления первичной частицы до центра тяжести образа), L (среднеквадратичная полудлина образа), W (среднеквадратичная полуширина образа), Conc (концентрированность образа, равная отношению суммы сигнала в двух максимальных ячейках к интегральной интенсивности образа).

Для разделения групп ядер ПКЛ применялся байесов подход в предположении о многомерном нормальном распределении признаков [21]. Классы объектов в этом случае соответствуют типам первичных ядер (в настоящей работе количество классов $M = 5$), а обучающая выборка представляет собой набор векторов признаков ливней из базы модельных событий. Процедура классификации более подробно описана в [18].

2. КРИТЕРИИ, ОСНОВАННЫЕ НА ПАРАМЕТРАХ ХИЛЛАСА

В настоящей работе были проанализированы критерии разделения ядер пяти типов, основанные на комбинациях параметров (D , L , W , Conc), измеренных одновременно на нескольких фиксированных расстояниях от оси ливня — (50, 100, 150, 200) м (размерность вектора признаков в данном случае равна 16). Для уменьшения влияния флуктуаций сигнала в периферийных областях ПУР ЧС, как и в [12], величины (D , L , W , Conc) вычислялись с использованием лишь тех угловых ячеек ПУР ЧС ШАЛ, величина сигнала в которых превышает 100 фотоэлектронов.

Результат разделения групп ядер с вектором признаков, состоящим из 16 параметров (D , L , W , Conc), взятых на четырех расстояниях от оси ливня — (50, 100, 150, 200 м), приведен в табл. 1 (слева). Здесь высота уровня наблюдения составляла

1 км. В каждой строке приведены результаты распознавания (в долях единицы) ливней того типа, символ которого указан в начале строки. Доля правильно классифицированных событий того или иного типа лежит на главной диагонали получившейся матрицы. При этом p обозначает протоны, h — ядра гелия, n — азота, s — серы, f — железа. Так, цифры в первой строке означают, что 74% ливней от первичных протонов было классифицировано правильно, а оставшиеся 26% — как первичные ядра гелия. Те ячейки таблицы, в которых стоят нулевые значения, соответствуют оценке ошибки классификации $< 2\%$.

Аналогичные результаты для случая уровня наблюдения 4 км представлены в табл. 1 (справа). Напомним, что в данном случае вместо ливней от ядер серы были рассчитаны ШАЛ, инициированные первичными ядрами кальция (обозначены буквой c). Ошибки классификации первичных протонов, ядер гелия и азота для случая уровня наблюдения 4 км сравнимы с аналогичными значениями для высоты 1 км.

3. КРИТЕРИИ, ОСНОВАННЫЕ НА НОВЫХ ПАРАМЕТРАХ

В [18] были предложены новые параметры ПУР ЧС ШАЛ, равные отношениям интегралов по двум полосам угловых распределений ЧС (схема выбора двух таких переменных k и η изображена на рисунке). Там же была проведена классификация ливней с использованием двух новых параметров, взятых на определенном расстоянии от оси. При этом параметры полос (для двух переменных при фиксированной ширине полосы их восемь) выбирались на основании феноменологических соображений.

Прежде всего было найдено, что уже две новые переменные, использованные в [18] для случая классификации ливней от первичных протонов и ядер азота, обеспечивают сравнительно хорошее (с ошибкой классификации около 10–15%) разделение ливней, инициированных первичными протонами, ядрами азота и железа. Кроме того, те

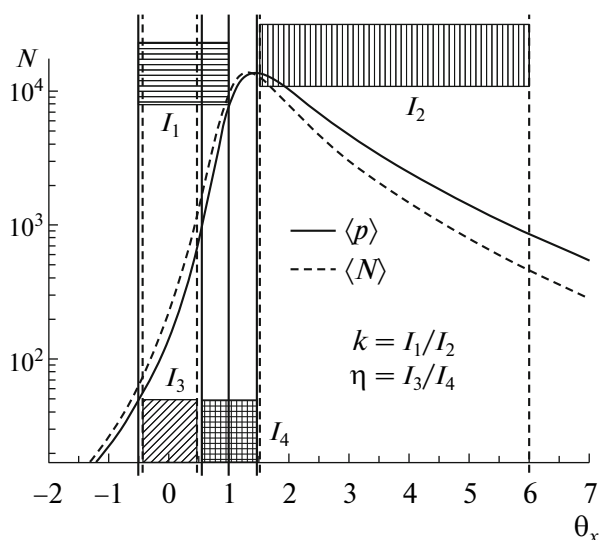


Схема выбора границ интегрирования. По оси ординат отложен интеграл по горизонтальной полосе углового распределения ЧС ШАЛ (θ_x измеряется в градусах). Ширина полосы интегрирования 1.5° .

же самые параметры позволяют выделить $\approx 38\%$ первичных протонов при полном, с точностью до имеющейся статистики, подавлении ливней от ядер гелия (и более тяжелых ядер).

Использование вектора признаков более высокой размерности, чем 2, позволяет достигнуть дальнейшего уменьшения ошибки классификации. При этом возникает вопрос о методе поиска набора новых переменных, позволяющих достигнуть хорошего разделения групп ядер ПКЛ. В настоящей работе этот вопрос исследован для случая разделения протонов и ядер гелия; при этом, как будет видно дальше, разделение других ядер сильно не ухудшится. Для поиска новых переменных использован алгоритм, основанный на последовательной оптимизации доли правильно классифицированных протонных событий на че-

тырех расстояниях от оси ливня. Хотя этот метод не приводит к нахождению глобального оптимума в многомерном пространстве параметров, он позволяет тем не менее добиться существенного уменьшения ошибки классификации по сравнению с методикой, использующей “продольные параметры Хилласа” D и L .

Результаты классификации с восемью параметрами D и L приведены в табл. 2 (слева). Ошибка классификации первичных протонов составляет 52%. Аналогичные результаты, но для случая новых параметров, оптимизированных для выделения первичных протонов, представлены в табл. 2 (справа). Ошибка классификации первичных протонов составляет 32%, т. е. существенно меньше, чем в случае использования параметров D и L .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полного статистического моделирования пространственно-углового распределения черенковского света широких атмосферных ливней (ПУР ЧС ШАЛ) построены многомерные байесовы критерии разделения групп ядер первичных космических лучей сверхвысоких энергий.

Разработанная методика классификации дает возможность идентифицировать значительную (десятки процентов) часть ливней, принадлежащих к каждой из этих групп ядер. Наряду с использованием параметров (D, L, W, Conc), характерных для гамма-астрономии, найдены новые величины, характеризующие угловой образ ПУР ЧС ШАЛ, позволяющие существенно повысить чувствительность методики к массе первичного ядра.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям, госконтракт номер 02.740.11.5092, а также грантом НШ-3517.2010.2.

Таблица 2. Результаты многомерной классификации с 8 параметрами (D, L) для случая пяти типов первичных ядер, первичной энергии 1 ПэВ и высоты уровня наблюдения 1 км (слева). Справа — результаты многомерной классификации с 8 новыми параметрами при тех же условиях, что и в левой части таблицы

	p	h	n	s	f		p	h	n	s	f
p	0.48	0.40	0.12	0.00	0.00	p	0.68	0.24	0.08	0.00	0.00
h	0.06	0.74	0.20	0.00	0.00	h	0.08	0.68	0.24	0.00	0.00
n	0.02	0.12	0.68	0.12	0.06	n	0.02	0.16	0.52	0.22	0.08
s	0.00	0.04	0.18	0.38	0.40	s	0.00	0.00	0.12	0.62	0.26
f	0.00	0.00	0.08	0.06	0.86	f	0.00	0.00	0.02	0.20	0.78

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Antoni T., Apel W.D., Badea A.F. et al. (*The KASCADE Collaboration*) // *Astropart. Phys.* 2005. V. 24. P. 1.
2. Aglietta M., Alessandro B., Antonioli P. et al. (*The EAS-TOPO Collaboration*) // *Astropart. Phys.* 2004. V. 21. P. 583.
3. Fowler J.W., Fortson L.F., Jui C.C.H. et al. // *Astropart. Phys.* 2001. V. 15. P. 49.
4. Arqueros F., Barrio J.A., Bernlohr K. et al. (*The HEGRA Collaboration*) // *Astron. and Astrophys.* 2000. V. 359. P. 682.
5. Tsunesada Y., Kakimoto F., Furuhashi F. et al. (*The BASJE Collaboration*) // *Proc 30th ICRC. Merida.* 2008. V. 4. P. 127.
6. Chernov D.V., Korosteleva E.E., Kuzmichev L.A. et al. (*The Tunka Collaboration*) // *Int. J. Mod. Phys. A.* 2005. V. 20. P. 6799.
7. Aloisio R., Berezinsky V.S., Blasi P., Ostapchenko S. // *Phys. Rev. D.* 2008. V. 77. 025007.
8. Wibig T., Wolfendale A. // *Open Astron. J.* 2009. V. 2. P. 95.
9. Abbasi R.U., Abu-Zayyad T., Al-Seady M. et al. (*The HiRes Collaboration*) // *Phys. Rev. Lett.* 2010. V. 104. 161101.
10. Abraham J., Abreu P., Aglietta M. et al. (*The Pierre Auger Collaboration*) // *Phys. Rev. Lett.* 2010. V. 104. 091101.
11. Berezinsky V.S., Gazizov A., Grigorieva S. et al. // *Phys. Rev. D.* 2006. V. 74. 043005.
12. Aharonian F.A., Bugayov V.V., Kettler J. et al. // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B.* 2003. V. 201. P. 217.
13. Anokhina A.M., Antonov R.A., Bonvech E.A. et al. // *Bull. Lebedev Phys. Inst.* 2009. V. 36. P. 146.
14. Antonov R.A., Anokhina A.M., Bonvech E.A. et al. // *31th ICRC. Lodz.* 2009. 0434.
15. Heck D., Knapp J., Capdevielle J.N. et al. // *Forschungszentrum Karlsruhe Report FZKA 6019.* 1998.
16. Ostapchenko S. // *Nucl. Phys. B – Proc. Suppl.* 2006. V. 151. P. 143.
17. Fesefeldt H.C. // *Technical Report No. PITHA 85-02 RWTH.* 1985.
18. Галкин В.И., Джамтоев Т.А. // *Вестн. МГУ.* 2010. № 3. С. 37.
19. Hillas A.M. // *Proc 19th ICRC. La Jolla.* 1985. V. 3. P. 445.
20. Weekes T.C., Cawley M.F., Fegan D.J. et al. // *Astrophys. J.* 1989. V. 342. P. 379.
21. Theodoridis S., Koutroumbas K. // *Pattern Recognition.* Elsevier, San Diego, 2003.