

А. А. Лагутин, Н. В. Становкина

**Метод идентификации типа первичной частицы
космического излучения на основе
многокомпонентного анализа характеристик ШАЛ**

Обсуждается метод идентификации типа первичной частицы космического излучения, основанный на использовании комбинации характеристик t_{max} и ρ_{600} широких атмосферных ливней. Для решения проблемы используется база данных, полученная с помощью кода *CORSIKA* (модель *QGSjet*) для ливней, генерируемых пятью типами ядер *P, He, C, Si, Fe* в диапазоне энергий $10^{17} \div 10^{19}$ эВ. Показано, что применение данных о плотности вероятности $f(\tau, \rho)$ для стандартизованных величин (t_{max}, ρ_{600}) позволяет провести эффективное разделение ливней на группы (*P + He*), *C*, (*Si + Fe*). Приведены оценки эффективности метода.

1. Введение

Исследование массового состава первичного космического излучения (ПКИ) ультравысоких (УВ) энергий $E > 10^{17}$ эВ принадлежит к числу важных задач современной астрофизики. От результатов этих исследований в значительной мере зависит решение проблемы происхождения и ускорения космических лучей.

Информацию о составе ПКИ в этой энергетической области получают путем анализа характеристик широких атмосферных ливней (ШАЛ). Строго говоря, восстановление состава ПКИ по экспериментальным данным о ШАЛ следует проводить методом решения обратной задачи. Однако, в силу отсутствия в настоящее время достаточных данных для реализации этого метода, решение обратной задачи находят через решения прямых задач для некоторого множества моделей спектра ПКИ и адрон-ядерных взаимодействий. Считается, что результатами эксперимента являются параметры той модели, для которой расчетные значения наиболее близки данным наблюдениям. В процедуре восстановления состава ПКИ в качестве базовых характеристик ШАЛ часто используют глубину максимума ливня t_{max} , плотность частиц на расстоянии 600 м от оси ливня ρ_{600} , число электронов и мюонов на уровне наблюдения.

В недавней работе группы HiRes - MIA [1] был предложен новый метод идентификации типа первичной частицы, основанный на использовании комбинации характеристик t_{max} и ρ_{600} . На примере модельных ливней от первичных протонов и ядер железа было показано, что новый параметр

$$m = \lg(\rho_{600}) \cdot \cos \alpha - t_{max} \cdot \sin \alpha + m_0 \quad (1)$$

при специальном выборе m_0 позволяет по данным

(t_{max}, ρ_{600}) разделить ШАЛ от протонов ($m < 0$) и ядер железа ($m > 0$). Применение этого подхода к анализу экспериментальных данных HiRes - MIA позволило заключить [1], что в области $10^{17} \div 10^{18}$ эВ происходит "облегчение" спектра ПКИ.

Целью данной работы является анализ возможностей подхода [1] в случае ливней, порожденных пятью типами первичных частиц *P, He, C, Si, Fe*. Показывается, что с использованием данных о плотности вероятности $F(t_{max}, \rho_{600})$ возможно эффективное разделение ливней от (*P + He*), *C*, (*Si + Fe*).

2. Метод

Информационной базой работы является банк данных значений (t_{max}, ρ_{600}) , сформированный с использованием кода *CORSIKA* (v.6.0, модель *QGSjet*) [2, 3]. Расчеты проведены для пяти типов первичных частиц (*P, He, C, Si, Fe*) и трех первичных энергий $10^{17}, 10^{18}, 10^{19}$ эВ. Для каждой энергии и каждого типа первичной частицы было разыграно по 100 ливней в стандартной атмосфере.

На рис.1 в качестве примера представлены результаты расчетов характеристик (t_{max}, ρ_{600}) для ШАЛ от протонов и ядер железа при $E = 10^{18}$ эВ. Видно, что на плоскости $t_{max} - \rho_{600}$ ливни от частиц разного типа формируют два практически не пересекающихся множества.

Совсем другая картина наблюдается в случае пяти групп ядер ПКИ. Множество значений (t_{max}, ρ_{600}) , соответствующих ШАЛ от первичных частиц разного типа (см. рис.2), теперь перекрываются, что приводит к необходимости уточнения способа классификации данных по типу ядра.

Для восстановления массового состава ПКИ по

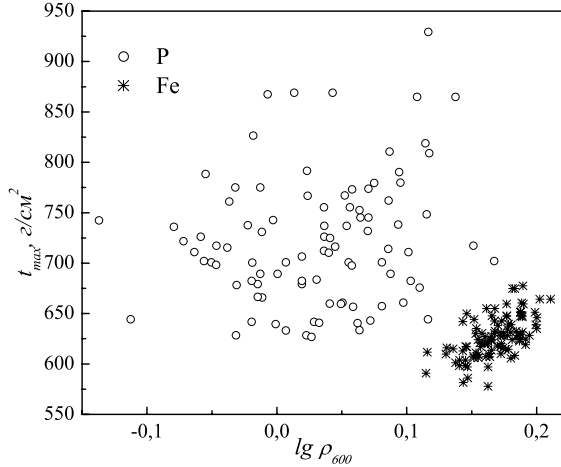


Рис. 1. t_{max} и ρ_{600} для ШАЛ от первичных протонов (o) и ядер железа (*) энергии $E = 10^{18}$ эВ

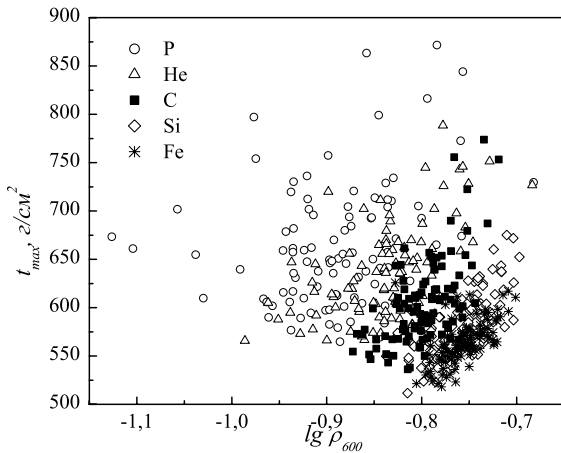


Рис. 2. t_{max} и ρ_{600} для ШАЛ от ядер P , He , C , Si , Fe энергии $E = 10^{17}$ эВ

данным (t_{max} , ρ_{600}) в настоящей работе предлагается использовать двумерные плотности вероятности $F(t_{max}, \rho_{600})$. Пробные расчеты показали, что спроектированные на плоскость $t_{max} - \rho_{600}$ пересечения поверхностей F , описывающих распределения (t_{max} , ρ_{600}) в ШАЛ от двух ($P + He + C$; $Si + Fe$) или трех ($P + He$; C ; $Si + Fe$) групп ядер, позволяют проводить достаточно эффективное разделение ШАЛ по типу первичной частицы.

Принимая во внимание практическое применение данного подхода разделения ливней по группам ядер при совместной обработке характеристик t_{max} и ρ_{600} ШАЛ в эксперименте, предлагается предварительно выполнить процедуру стандартизации экспериментальных данных с исполь-

зованием всего массива (t_{max}, ρ_{600}), для рассматриваемой энергии. При численной реализации этого метода вместо (t_{max}, ρ_{600}) удобно использовать переменные τ и ρ

$$\tau = (t_{max}/\sigma_t) - \overline{(t_{max}/\sigma_t)}, \quad (2)$$

$$\rho = (\lg \rho_{600}/\sigma_{\lg \rho_{600}}) - \overline{(\lg \rho_{600}/\sigma_{\lg \rho_{600}})}, \quad (3)$$

где σ_i обозначает среднеквадратичное отклонение величины i , а черта – среднее значение величины. В данной работе процедура стандартизации выполнена по объединенным данным (t_{max}, ρ_{600}) для ШАЛ от всех групп ядер для каждой энергии $10^{17}, 10^{18}, 10^{19}$ эВ.

Распределения по t_{max} и ρ_{600} в отдельности, как и их совместные распределения для τ и ρ , описывались соответственно одномерными $F(t_{max})$, $F(\rho_{600})$ и двумерными $f(\tau, \rho)$ логнормальными распределениями. В [4, 5] было показано, что распределение этого класса можно использовать для описания ряда характеристик ШАЛ. На рис.3, в качестве примера, представлено распределение по t_{max} в ливнях, порожденных первичным ядром He при $E = 10^{18}$ эВ.

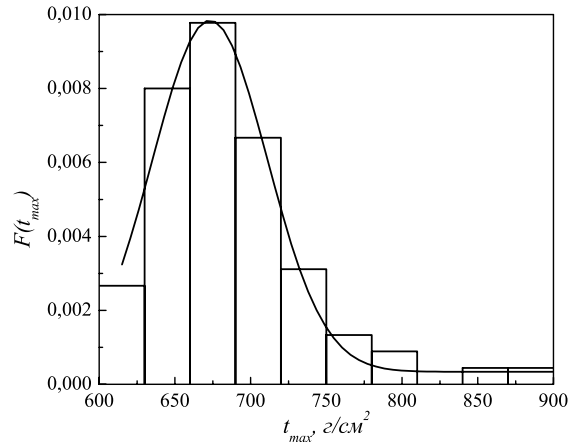


Рис. 3. Распределение по t_{max} в ливнях, порожденных первичным ядром He при $E = 10^{18}$ эВ. Гистограмма - результат расчета, сплошная линия - аппроксимация результатов логнормальным распределением

Для каждой рассматриваемой энергии и различных типов первичных ядер, в том числе и для ядер, объединенных в группы $P + He$, $P + He + C$, $Si + Fe$, были построены плотности распределения вероятностей $f(\tau, \rho)$. Пересечение поверхностей $f(\tau, \rho)$ дает линии m_I и m_{II} , оптимально разделяющие ядра на группы ($P + He$), C и

($Si + Fe$) соответственно. Результаты расчетов для m_I и m_{II} аппроксимированы выражением $\tau = a_{I(II)} + b_{I(II)} \cdot \rho$. Входящие в аппроксимацию коэффициенты $a_{I(II)}$ и $b_{I(II)}$ представлены в таблице 1.

Таблица 1
Коэффициенты аппроксимации линий m_I и m_{II} , разделяющих ядра на группы ($P + He$), C и ($Si + Fe$)

Е, эВ	a_I	b_I	a_{II}	b_{II}
10^{17}	-0,97	2,34	-1,04	1,59
10^{18}	1,04	0,93	-0,89	1,36
10^{19}	1,07	1,29	-1,19	2,22

Пример разделения ливней, порожденных разными ядрами, линией m_{II} на две группы ($P+He+C$; $Si+Fe$) приводится на рис.4. На рис.5 представлено разделение ливней линиями m_I и m_{II} на зоны 1, 2, 3, которые соответствуют ядрам ($P + He$), C , ($Si + Fe$).

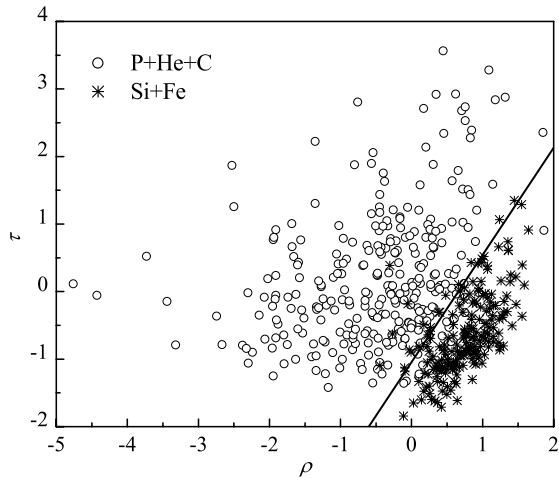


Рис. 4. Стандартизованные данные для t_{max} и ρ_{600} при $E = 10^{17}$ эВ, разделенные линией m_{II} на две группы ($P + He + C$; $Si + Fe$)

3. Валидация метода

С целью оценки эффективности предлагаемого метода идентификации выполнено восстановление типа первичной частицы с использованием данных модельного эксперимента с составами ПКИ, обсуждаемых в [6, 7]. Оно показало, что при разделении данных на три группы эффективность попадания ядер групп ($P + He$) в зону 1 и ($Si + Fe$) в зону 3 составляет до 90%. Из рис.5

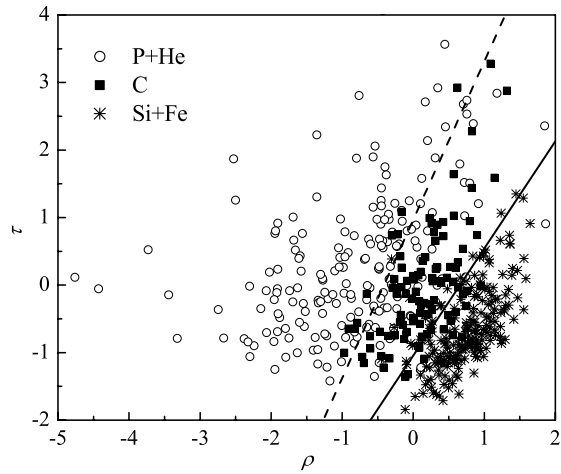


Рис. 5. Стандартизованные данные для t_{max} и ρ_{600} при $E = 10^{17}$ эВ, разделенные на три группы ($P+He$; C ; $Si+Fe$); m_I - пунктирная линия, m_{II} - сплошная линия

видно, что в зоне 2 происходит сильное перемешивание ливней от первичных частиц разного типа. Первые расчеты, выполненные с использованием данного метода, позволили установить, что в диапазоне энергий $10^{17} \div 10^{18}$ эВ в зоне 2 доля ядер углерода составляет $\sim 50\%$ от всех частиц в этой зоне.

Принимая во внимание результаты расчетов, предлагается считать элементом распознавания предложенного метода три группы ядер ($P + He$; C ; $Si + Fe$), учитывая что в зоне 2 на долю углерода приходится 50%. В таблице 2 приведены тестируемые составы [6, 7] и результаты их восстановления по данному методу. Погрешность распознавания ядер для энергий $10^{17} \div 10^{18}$ эВ не превышает 30%.

4. Заключение

Выполнен анализ возможности идентификации типа первичной частицы ПКИ с использованием базовых характеристик t_{max} и ρ_{600} ШАЛ в случае ливней, порожденных пятью типами ядер P , He , C , Si , Fe для энергий $10^{17} \div 10^{19}$ эВ.

Для восстановления состава ПКИ предложено использовать данные о плотности вероятности $f(\tau, \rho)$ для стандартизованных величин t_{max} и ρ_{600} . Расчеты показали, что спроектированные на плоскость $\tau - \rho$ пересечения поверхностей f от двух ($P + He + C$; $Si + Fe$) или трех ($P+He$; C ; $Si+Fe$) групп ядер позволяют провести достаточно эффективное разделение ливней по типу первичной частицы.

Исходные составы ПКИ [6, 7] и результаты их восстановления по предложенному методу

Е, эВ	модель	$P + He$	C	$Si + Fe$	всего ШАЛ
10^{17}	состав[6]	0,34	0,15	0,51	383
	восст.	0,40	0,14	0,46	
	состав[7]	0,25	0,17	0,58	351
	восст.	0,36	0,16	0,48	
	состав[7]	0,28	0,25	0,47	
10^{18}	восст.	0,39	0,16	0,45	388
	состав[6]	0,34	0,14	0,52	363
10^{19}	восст.	0,37	0,15	0,48	
	состав[6]	0,75	0,07	0,18	268
восст.	0,58	0,15	0,27		

Используя данный метод идентификации были восстановлены составы ПКИ, предсказанные в работах [6, 7], используя банк данных характеристик ШАЛ для ядер P , He , C , Si , Fe . Показано, что для групп "легких" ($P + He$) и "тяжелых" ($Si + Fe$) ядер эффективность распознавания типа ядра в соответствующих зонах 1 и 3 составляет около 90%. Для зоны 2 сильного перемешивания (t_{max} , ρ_{600}) от разных ядер предлага-

ется считать, что доля ядер углерода составляет порядка 50% всех попавших частиц. Показано, что предложенный метод восстановления массового состава ПКИ позволяет воспроизводить тестовый состав с погрешностью не превышающей 30% для энергий $10^{17} \div 10^{18}$ эВ.

Данная работа поддержана грантом Минобрразования России А 03-2.9-523.

Список литературы

1. *T. Abu-Zayyad, K. Belov et al.* A Multi-Component of the Cosmic Ray Composition Between 10^{17} eV and 10^{18} // arXiv: astro-ph/9911144 v1 1999. 14 p.
2. *Н.Н. Калмыков, С.С. Остапченко.* Ядро-ядерное взаимодействие, фрагментация ядер и флуктуации широкие атмосферных ливней // Ядерная физика. 1993. Т. 56. Вып. 3. С. 105.
3. *D. Heck, J. Knapp.* Extensive Air Shower Simulation with CORSIKA: A User's Guide (Version 6.00 from December 13, 2000) – Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH. 2000. 95 p.
4. *Н.Н. Калмыков.* О применении логарифмически нормального распределения к анализу экспериментальных данных по широким атмосферным ливням // Ядерная физика. 1969. Т. 10. С. 121.
5. Космическое излучение сверхвысокой энергии / *Г.Б. Христиансен, Г.В. Куликов, Ю.А. Фомин.* – М.: Атомиздат, 1975. 256 с.
6. *А.А. Лагутин, А.Г. Тюменцев.* Энергетические спектры космических лучей в галактической среде фрактального типа // Изв. Акад. наук. Сер. физ. 2003. Т. 67. № 4. С. 439.
7. *G.B. Khritiansen, Yu.A. Fomin et al.* The Primary Cosmic Ray Mass Composition around the Knee of the Energy Spectrum // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). 1995. 39 A. P. 235.