

АСТРОНОМИЯ И ФИЗИКА КОСМОСА

УДК 537.591.15

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВКЛАДА НЕЙТРОНОВ В ОБЩИЙ
ПОТОК АДРОНОВ ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ
НА УРОВНЕ $\sim 10 \text{ г/см}^2$ СТРАТОСФЕРЫ

И. С. Заярная

В данной работе методом Монте-Карло выполнен расчет относительного вклада нейтронов в поток адронов с энергиями $\geq 20 \text{ ТэВ}$ на уровне экспонирования рентгено-эмulsionционных камер (РЭК) в стратосфере ($\sim 10 \text{ г/см}^2$) по модели EPOS-LHC, описывающей нуклон-ядерные и ядро-ядерные взаимодействия высоких энергий, с использованием программного пакета CORSIKA-7.7500 [1].

Ключевые слова: космические лучи, моделирование методом Монте-Карло, EPOS-LHC (CORSIKA-7.7500), нейтральные частицы, стратосферная рентгено-эмulsionционная камера.

Введение. В баллонном российско-японском эксперименте RUNJOB, проводившемся с 1995 г. по 1999 г., по данным обработки десяти РЭК, экспонировавшихся в длительных (около 150 часов) полетах на глубине атмосферы $\sim 10 \text{ г/см}^2$, получены спектры различных компонент первичного космического излучения с энергиями $\sim 1\text{--}500 \text{ ТэВ/нуклон}$ [2]. Общая экспозиция РЭК составляет $575 \text{ м}^2\text{час}$. В эксперименте было отмечено, что в спектр протонной компоненты галактических частиц входят события, отнесенные к нуклон-ядерным взаимодействиям, в $\sim 50\%$ которых трек первичной частицы не обнаружен [3]. Работа, проведенная с целью найти методические причины данного экспериментального факта, а также повторная обработка событий, отнесенных к нуклон-ядерным взаимодействиям, зарегистрированным в четырех РЭК экспозиций 1996 и 1999 годов с использованием нового метода поиска и прослеживания частиц в ядерно-эмulsionционных пленках РЭК, подтвердили отсутствие большого количества треков первичных частиц, которое не объясняется методикой эксперимента [4, 5]. Первичные частицы во взаимодействиях, отнесенных к нуклон-ядерным, могут быть и протонами, и нейтрона-

ми, образованными в результате взаимодействия первичного космического излучения с остаточной атмосферой толщиной $\sim 10 \text{ г/см}^2$. Однако при моделировании прохождения галактических частиц до уровня экспонирования РЭК с использованием модели нуклон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий MC0 [6] вклад нейтронов в интервале зенитных углов $0^\circ < \theta < 70^\circ$ составляет $\sim 4\%$ и не превышает 11% при больших углах ($\sim 75^\circ$) [7]. Для сравнения с этим результатом моделирования в данной работе проведен расчет вклада нейтронов в общий поток адронов на наблюдаемом уровне по опирающейся на современные ускорительные данные модели EPOS-LHC, входящей в программный пакет CORSIKA 7.7500.

Моделирование относительного вклада нейтронов на уровне экспонирования РЭК. Общий поток частиц на глубине атмосферы складывается из потока частиц, прошедших без взаимодействия, и вторичных, образованных в процессах нуклон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий.

Изменение числа нуклонов с энергией E с глубиной атмосферы t определяется как

$$N(E, t) = N(E, 0)e^{-t/L},$$

где $L = \lambda_{\text{вз}}/(1 - < k^{\gamma-1} >)$ – пробег поглощения, $\lambda_{\text{вз}}$ – пробег для взаимодействия, k – коэффициент упругости, γ – показатель степени энергетического спектра.

Из формулы видно, что основные параметры для моделирования потока нейтронов на глубине $\sim 10 \text{ г/см}^2$ – это пробеги неупругого взаимодействия ядер в воздухе, коэффициент упругости, наклон спектра.

Пробег неупругого взаимодействия частиц связан с сечением неупругого взаимодействия, которое логарифмически зависит от энергии налетающей частицы. В космических лучах используются аппроксимации энергетических зависимостей сечений неупругих нуклон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий, полученных по экспериментальным данным ускорителей (LHC, Tevatron).

В модели MC0, ранее используемой в расчетах эксперимента RUNJOB, сечение неупругого взаимодействия протона с воздухом линейно зависит от логарифма энергии [8]:

$$\sigma_{\text{p-air}}^{\text{inel}}(s) = 140 + 16.8 \ln(s/1 \text{ ГэВ}^2) + 56345/(s/1 \text{ ГэВ}^2) \text{ [мб]},$$

где s – квадрат энергии нуклона в СЦМ [ГэВ^2].

В адронных моделях QGSJET-II-04 и EPOS-LHC, входящих в программный пакет CORSIKA-7.7500, логарифмическая зависимость неупругого сечения протон-протонных

взаимодействий имеет квадратичный характер:

$${}^{\text{inel}}\sigma_{\text{pp}}(s) \approx 34 + 1.2 \ln(s/1 \text{ ГэВ}^2) + 0.12 \ln^2(s/1 \text{ ГэВ}^2) [\text{мб}]$$

по модели QGSJET-II-04 [9],

$${}^{\text{inel}}\sigma_{\text{pp}}(s) \approx 35 + 1.1 \ln(s/1 \text{ ГэВ}^2) + 0.15 \ln^2(s/1 \text{ ГэВ}^2) [\text{мб}]$$

по модели EPOS-LHC [10, 11].

Переход к сечению нуклон-ядерного взаимодействия основан на зависимости:

$${}^{\text{inel}}\sigma_{\text{NA}} = {}^{\text{inel}}\sigma_{\text{NN}} \cdot A^{\alpha(E)},$$

где ${}^{\text{inel}}\sigma_{\text{NN}}$ – сечение неупругого нуклон-нуклонного взаимодействия (из модели), A – массовое число ядра-мишени, $\alpha(E)$ – параметр, зависящий от энергии (обычно $\approx 0.7\text{--}0.9$).

Для воздуха среднее массовое число $A \approx 14.5$, поэтому

$${}^{\text{inel}}\sigma_{\text{p-air}} \approx {}^{\text{inel}}\sigma_{\text{pp}} \cdot 14.5^{\alpha(E)}.$$

Поскольку в модели EPOS-LHC значение неупругого нуклон-ядерного сечения при энергиях $\sqrt{s} > 100$ ГэВ наибольшее, то в данной работе расчет относительного вклада вторичных нейтронов в полный поток протонов, нейтронов, пионов, каонов на уровне экспонирования РЭК проведен с использованием этой модели.

В моделях MC0, QGSJET-II-04 и EPOS-LHC вероятность неупругой перезарядки принимает значение от 0.43 до 0.49. Коэффициент перезарядки нуклонов (отношение числа протонов к числу нейтронов среди продуктов взаимодействия) зависит от энергии налетающей частицы и атомного номера мишени. Для протонов с энергией > 1 ТэВ наибольшее значение коэффициента перезарядки дает модель EPOS-LHC ($p/n \approx 1.05\text{--}1.15$) из-за учета коллективных эффектов в плотной среде.

В данной работе в рамках модели EPOS-LHC методом Монте-Карло разыгрывалось ~ 100000 первичных ядер, падающих на границу атмосферы по дифференциальному энергетическому спектру с показателем $\beta = -2.7$ для всех компонент. Пороговая энергия частиц, падающих на установку, ≥ 20 ТэВ. Верхняя энергетическая граница – 10^{15} эВ. Для сравнения с результатами расчета по модели MC0 разыгрывались взаимодействия тех же ядер с зарядом $Z = 1, 2, 3, 6, 8, 12, 14, 20, 26$ с соответствующими весами: 0.37; 0.2; 0.01; 0.05; 0.05; 0.05; 0.05; 0.02; 0.2, с угловым распределением $\sim \cos(\theta)$

для учета уменьшения площади установки, а также интегральное значение вклада нейтронов в общий поток адронов в интервале углов $[0^\circ; 70^\circ]$.

Результаты и обсуждение. В области энергий 20–1000 ТэВ самая многочисленная компонента в потоке первичных галактических частиц – протоны, поэтому они вносят наибольший вклад в общий поток высокoenергичных адронов на высоте ~ 10 г/см².

В таблице 1 представлены результаты расчетов по модели EPOS-LHC в сравнении с ранее проведенными расчетами по модели MC0.

Таблица 1

Относительный вклад нуклонов и мезонов в их общий поток, рассчитанный по адронным моделям MC0, EPOS-LHC, при различных зенитных углах падения первичных частиц на установку

$\cos(\theta)$	MC0 [7]			EPOS-LHC		
	p	n	$\pi^\pm + K^\pm$	p	n	$\pi^\pm + K^\pm$
0.95	94.5%	3.5%	1.99%	89.5%	9.2%	1.3%
0.45	89.9%	6.7%	3.4%	82.4%	15.4%	2.2%
0.34				81.1%	16.3%	2.6%
$0^\circ \div 70^\circ$	93%	4%	3%	87.1%	11.5%	1.4%

Из табл. 1 видно, что величина относительного вклада нейтронов в общий поток адронов на уровне наблюдения, рассчитанная по модели EPOS-LHC, больше примерно в 2.5 раза расчетных значений по модели MC0. Безусловно, это связано с большими значениями сечения неупругого взаимодействия (квадратичная логарифмическая зависимость от энергии) и коэффициента перезарядки нуклонов. Для больших углов относительный поток нейтронов не превышает 16.5%. В интервале зенитных углов $[0^\circ; 70^\circ]$ интегральный вклад нейтронов в потоке высокoenергичных нуклонов и адронов (≥ 20 ТэВ) на глубине атмосферы ~ 10 г/см² – 11.5%.

Заключение. В работе получены значения относительного вклада вторичных нейтронов в поток протонов, нейтронов, пионов, каонов на уровне наблюдения для зенитных углов в интервале $[0^\circ; 70^\circ]$, рассчитанные по модели EPOS-LHC с использованием программного пакета CORSIKA-7.7500. При больших углах вклад нейтронов не более 16.5%, интегральный вклад в рассматриваемом диапазоне углов – 11.5%.

Большое количество ($\sim 50\%$) зарегистрированных в эксперименте RUNJOB событий, отнесенных к нуклон-ядерным взаимодействиям, в которых трек первичной частицы отсутствует в области поиска, не удается объяснить, используя модель EPOS-LHC,

опирающуюся на современные ускорительные данные. Если предположить, что в потоке галактических частиц присутствует компонента, которая при прохождении через вещество ядерной эмульсии оказывает слабую ионизацию, то треки таких частиц не будут наблюдаться в оптическом диапазоне. Это предположение требует дальнейших исследований.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] D. Heck, Report FZKA 7254 (2006). DOI: 10.5445/IR/270066237.
- [2] V. A. Derbina, V. I. Galkin, M. Hareyama, et al., Astrophysical Journal, No. 1, 41 (2005). DOI: 10.1086/432715.
- [3] A. V. Apanasenko, V. A. Sukhadolskaya, V. A. Derbina, et al., Astropart. Phys. **16**, 13 (2001). DOI: 10.1016/S0927-6505(00)00163-8.
- [4] И. С. Заярная, Ядерная Физика **71**(2), 280 (2008). DOI: 10.1134/S1063778808020075.
- [5] И. С. Заярная, Т. А. Ирхина, Краткие сообщения по физике ФИАН **46**(5), 3 (2019). DOI: 10.3103/S1068335619050014.
- [6] Р. А. Мухамедшин, Диссертация д.физ.-мат. н. (ИЯИ РАН, 2006).
- [7] В. А. Березовская, В. И. Галкин, Р. А. Мухамедшин и др., Препринт НИИЯФ МГУ-97-43/494 (Москва, 1997).
- [8] Ю. М. Шабельский, ЭЧАЯ **12**, 1070 (1981).
- [9] S. S. Ostapchenko, Phys. Rev. D **83**, 014018 (2011).
- [10] T. Pierog, Iu. Karpenko, J. M. Katzy, et al., EPOS LHC: test of collective hadronization with LHC data, arXiv: 1306.0121v2.
- [11] T. Pierog, Air Shower Simulation with a New Generation of post-LHC Hadronic Interaction Models in CORSIKA, PoS(ICRC2017)1100. DOI: 10.22323/1.301.1100.

Поступила в редакцию 9 июня 2025 г.

После доработки 9 июля 2025 г.

Принята к публикации 9 июля 2025 г.