

О РОСТЕ С ЭНЕРГИЕЙ СЕЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АДРОНОВ С ЯДРАМИ АТОМОВ ВОЗДУХА НА ОСНОВАНИИ ВЫСОТНОГО ХОДА ШАЛ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПРИ ЭНЕРГИЯХ СВЫШЕ 10^{15} эВ

К.В. Баркалов, А.Г. Дубовый, П.А. Дятлов, Н.М. Нестерова, П.В. Ставрев

Данные о поглощении электронной компоненты ШАЛ в атмосфере, полученные на модернизированной тянь-шаньской установке, указывают на меньшую величину сечения в области энергий 1–20 ПэВ, чем при экстраполяции ускорительных данных о взаимодействии pp и пересчете к взаимодействию с ядрами.

С помощью модернизированной установки "Адрон" на тянь-шаньской станции /1, 2/ получены экспериментальные данные о высотном ходе широких атмосферных ливней (ШАЛ) космических лучей при энергиях $E_0 = 1 - 20$ ПэВ. Исследовано поглощение электронов в диапазоне числа электронов $N_e = 5 \cdot 10^5 + 10^7$ на глубинах в атмосфере $P = 700 - 1200$ г·см⁻² при постоянных интенсивностях ШАЛ I от $3 \cdot 10^{-13}$ до 10^{-11} см⁻²с⁻¹стер⁻¹.

Высотный ход ШАЛ зависит как от ядерного состава первичных космических частиц, так и от характеристик взаимодействия адронов с ядрами атомов воздуха (множественности вторичных частиц, коэффициента неупругости, доли энергии, передаваемой в электронно-фотонную компоненту и др.) и их изменения с энергией. Во второй половине атмосферы поглощение числа электронов в ШАЛ особенно сильно зависит от сечения взаимодействия адронов с ядрами атомов воздуха σ_{n-Air}^{prod} . В данной работе экспериментальные результаты сравниваются с расчетами /3/, проведенными в различных предположениях о росте этого сечения с энергией.

В эксперименте число электронов в ШАЛ N_e определялось по плотности потока электронно-фотонной компоненты, регистрируемой с помощью многоканальной системы сцинтилляционных детекторов различной площади, отградуированных по показаниям газоразрядных счетчиков /2/. При модернизации тянь-шаньской установки кроме изменения центральной ее части ("ковра" из 33 детекторов) и четырех пунктов на расстоянии 20 м от центра были дополнительно установлены по несколько детекторов в 14 пунктах на расстояниях 17, 40 и 70 м от центра. Такое усовершенствование сцинтилляционной установки позволило более точно определять координаты оси, а также другие параметры ШАЛ на расстояниях свыше 7 м, и практически полностью избавиться от событий, случайно попавших в круг 20 м с больших расстояний из-за флуктуаций плотности потока электронов. Этому способствовал также новый алгоритм определения параметров ШАЛ /4/. Направление оси ШАЛ в пространстве (зенитный θ и азимутальный φ углы) измерялось с помощью системы "Хронотрон", регистрирующей задержки во времени прихода фронта ШАЛ в сцинтилляционные счетчики, расположенные в четырех пунктах на расстоянии 20 м. Управляющая система отбирала ШАЛ с $N_e > 5 \cdot 10^5$ в круге радиусом $R = 20$ м от центра. Дополнительный анализ показал отсутствие искажений параметров ШАЛ в этой области.

Было проанализировано около $2 \cdot 10^4$ ливней, зарегистрированных за ~ 8000 часов эффективного времени измерений, для которых определены параметры ШАЛ: X, Y – координаты оси, S – "возраст", θ, φ и N_e . В шести диапазонах по $N_e = (4,5-8-14-25-45-80-140) \cdot 10^5$ получены распределения по зенитным углам θ от 0 до 60° в интервалах $\Delta\theta = 5^\circ$, затем распределения интенсивностей I (числа ШАЛ на единицу площади в направлении, перпендикулярном оси, в единицу времени в единице телесного угла, соответствующего интервалу $\Delta\theta$). Затем этим распределениям были построены кривые равной интенсивности (высотный ход ШАЛ), представленные на рис. 1. Поглощение электронов оказалось несколько более быстрым, чем полученное ранее на тянь-шаньской установке до модернизации /5/.

На рис. 2 точками представлены экспериментальные данные при $I = 2 \cdot 10^{-12}$ см⁻²с⁻¹стер⁻¹. По соотношению $E_0(N_e)$, выведенному в работе /6/, ШАЛ с $N_e \sim 5 \cdot 10^6$ на уровне Тянь-Шаня образуются первичными частицами со средней энергией $E_0 \sim 10$ ПэВ.

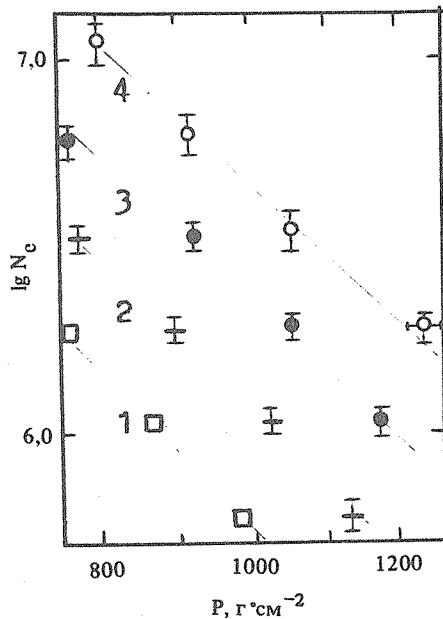


Рис. 1. Изменение числа электронов N_e с глубиной атмосферы P при интенсивностях ШАЛ I $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{стер}^{-2}$: 10^{-11} (1), $3 \cdot 10^{-12}$ (2), 10^{-12} (3), $3 \cdot 10^{-13}$ (4).

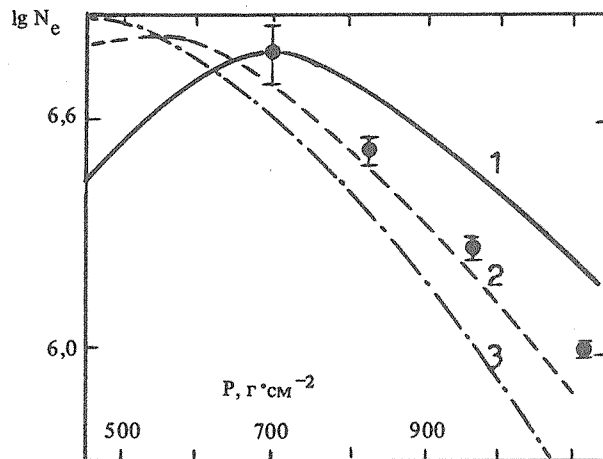


Рис. 2. Сравнение эксперимента при $I = 2 \cdot 10^{-12} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{стер}^{-1}$ с расчетными каскадными кривыми для трех вариантов роста с энергией сечения взаимодействия при $\alpha = 0,00$ (1), $0,03$ (2), $0,05$ (3).

На том же рисунке нанесены результаты расчетов /3/ каскадных кривых от первичных протонов с $E_0 = 10$ ПэВ для трех вариантов роста с энергией сечения взаимодействия $\sigma_{h-Air}^{prod} = 270 (1 + a \ln(E/0,1 \text{ ТэВ})) \text{ мбн}$ с a равными 1) 0, 2) 0,03 и 3) 0,05 при росте множественности в пионизационной области $\langle n_{s, \pi^0} \rangle \sim E^{0,5}$ и сохранении "скейлинга" во фрагментационной области энергетических спектров вторичных частиц. Быстрый рост множественности n_{s, π^0} лучше согласуется с результатами измерений на самолетных высотах ($P = 200 - 400 \text{ г}\cdot\text{см}^{-2}$) /7/, где число электронов существенно зависит от $\langle n_s \rangle$. Учет "смягчения" спектров во фрагментационной области, проведенный в работе /8/ согласно аддитивной кварковой модели, приводит к укрупнению каскадных кривых /3/. Как показал ряд расчетов, "каскадные кривые" при фиксированном E_0 примерно на столько же отличаются от кривых равной интенсивности ШАЛ, но в обратную сторону, так что недоучет "смягчения" вторичных спектров в /3/ компенсирует это различие. Согласно результатам эксперимента "Памир" можно ожидать еще большего нарушения "скейлинга" в области фрагментации. На рис. 2 приведены абсолютные значения как экспериментальных, так и расчетных данных.

Из рис. 2 видно, что экспериментальные результаты ближе к расчетной кривой $a = 0,03$, соответствующей более слабому росту с энергией сечения σ_{n-Air}^{prod} . Если учесть смешанный ядерный состав первичных частиц, то соответствующие расчетные кривые пойдут круче и эксперимент будет еще больше отличаться от модели с быстрым ростом сечения: $\sigma \sim \ln^2 E$ ($a \gtrsim 0,05$).

Таким образом, тьянь-шаньские экспериментальные данные по высотному ходу электронов, так же как по спектрам адронов /9, 10/ и пространственному распределению черенковского излучения /11/ в ШАЛ с $E_0 = 1 - 20$ ПэВ указывают, что сечение взаимодействия адронов с ядрами атомов воздуха, возможно, меньше, чем то, которое получается при экстраполяции ускорительных данных, наблюдаемых в pp-взаимодействиях, к энергиям ШАЛ и пересчете по Глауберу к взаимодействиям с ядрами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдрашитов С. Ф. и др. Изв. АН СССР сер. физич., 50, № 11, 2203 (1986).
2. Adamov D. S. et al. Proc. 20th ICRC, Moscow, 1987, v. 6. 144.
3. Ivanenko I. P., Kanevsky V. L., Roganova T. M. Proc. 16th ICRC, Kyoto, 1979, 9, 7.
4. Асейкин В. С., Никольская Н. М., Павлюченко В. П. Препринт ФИАН № 31, М., 1987.
5. Киров I. N. et al. Proc. 18th ICRC, Bangalore, 1983, 6, 15.
6. Афанасьев Б. Н. Черенковское излучение ливней космических лучей с первичной энергией $2 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^4$ ТэВ. Автореф. канд. диссер. М., ФИАН (1986).
7. Антонов Р. А., Иваненко И. П. Изв. АН СССР, сер. физич., 42, № 7, 1405 (1978).
8. Antonov R. A. et al. Proc. 18th ICRC, Bangalore, 1983, 6, 159.
9. Dubovy A. G. et al. Proc. 18th ICRC, Bangalore, 1983, 6, 163.
10. Danilova T. V. et al. Proc. 20th ICRC, Moscow, 1987, 6, 47.
11. Афанасьев Б. Н., Нестерова Е. М., Хейн Л. А. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 3, 42 (1987).

Поступила в редакцию 17 августа 1987 г.