

СНОВА О ЯДЕРНОПАССИВНЫХ ЧАСТИЦАХ И ХАРАКТЕРИСТИКАХ ПРОНИКАЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ ПОД ЗЕМЛЕЙ

А. Д. Ерлыкин, А. К. Куличенко, С. К. Мачавариани

В последние годы для объяснения ряда наблюдаемых явлений в космических лучах все чаще приходилось прибегать к гипотезам о генерации в нуклон-ядерных столкновениях высокой энергии тяжелых частиц со сравнительно большим временем жизни и значительной проникающей способностью /1, 2, 3, 4/. Поиски таких частиц в области энергий до 1 Тэв пока не дали положительного результата /5, 6, 7, 8/. В связи с исследованиями углового распределения мюонов, а также свойств горизонтальных атмосферных ливней и ливней, бедных мюонами, появились гипотезы о существовании ядерно-пассивной частицы в области энергий выше 1 Тэв /9, 10/.

Пробег поглощения этой частицы в воздухе, согласно гипотезе, должен не менее чем в 7 раз превосходить пробег поглощения нуклонов. Это позволяло объяснить особенности угловых распределений как горизонтальных атмосферных ливней, так и ливней бедных мюонами. Кроме того, предполагалось, что эта частица нестабильна и обладает лептонными модами распада, причем критическая энергия для этих мод распада $\sim 1,5 + 6$ Тэв. Это предположение позволяло объяснить угловые характеристики потока мюонов с $E_{\mu} \geq 1$ Тэв /11/. Сечение генерации частиц было выбрано таким образом, что позволяло одновременно объяснить интенсивности как горизонтальных и безмезонных ливней, так и энергетический спектр мюонов.

В работе /9/ было высказано предположение, что проникновение таких частиц под землю и их взаимодействие с мишенями установок может объяснить повышенную интенсивность ионизационных толчков под землей, наблюдавшуюся, например, в работе /1/. В работе /12/ тоже наблюдалась тенденция к повышению интенсивности каскадов с энергией несколько Тэв, наблюдаемых в подземном ионизационном калориметре под углами $\theta \leq 50^\circ$ к вертикали, по сравнению с ожидаемой, исходя из характера энергетического спектра этих каскадов в области меньших энергий. Хотя статистическая достоверность наблюдаемого повышения интенсивности каскадов пока еще невелика, представляет интерес проанализировать возможность объяснения такого эффекта с помощью гипотезы /9/.

Решение кинетического уравнения для потока гипотетических X-частиц $\omega(E, x, \theta)$ аналогично его решению для пионов:

$$\omega(E, x, \theta) = N(E) \langle u^{\delta} \rangle \frac{L}{\lambda} \alpha \exp(-x \sec \theta / \Lambda) \times$$

$$\times \left(\frac{x \sec \theta}{\Lambda} \right)^{-(B \sec \theta) / E} \int_0^{(x \sec \theta) / \Lambda} dt t^{(B \sec \theta) / E} \exp[-t(\alpha - 1)],$$

(1)

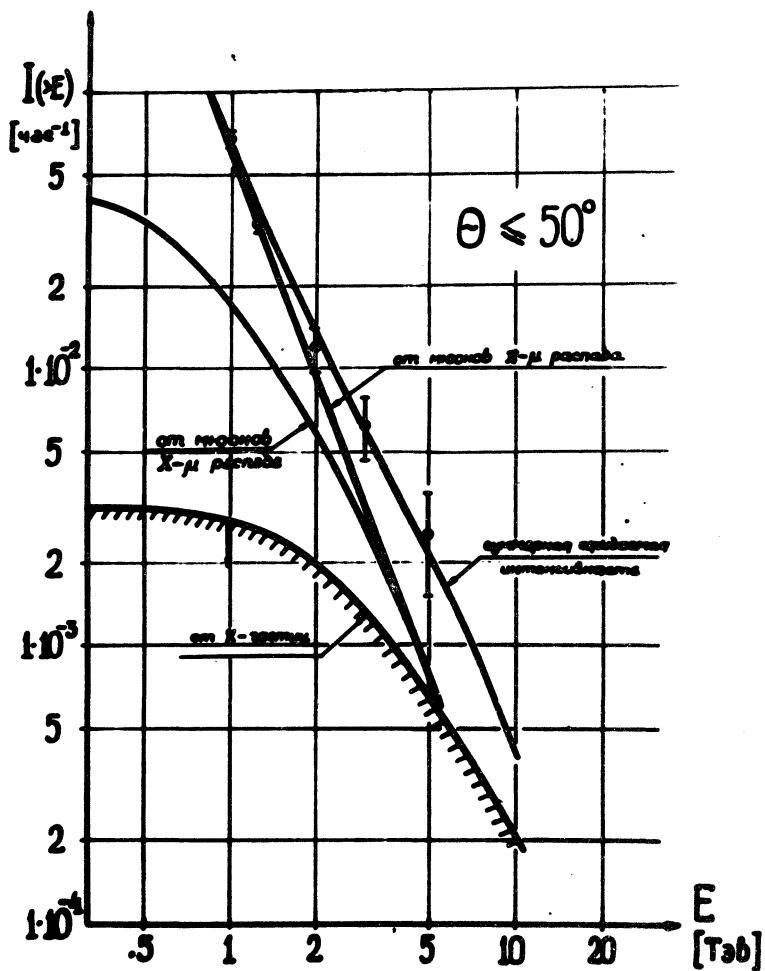
где $N(E)$ - поток первичных нуклонов на границе атмосферы, $\alpha = \Lambda / L$ - отношение пробегов поглощения X-частиц и нуклонов, B - критическая энергия распада X-частиц, $\langle u^{\delta} \rangle$ - отношение интенсивностей рожденных X-частиц и первичных нуклонов, L, λ - пробеги поглощения и взаимодействия первичных нуклонов.

Подставляя в выражение (1) значения $N(E)$ согласно работе /13/, $\alpha = 7$, $B = 1,5$ Тэв, $\Lambda = 770$ г/см² и $\langle u^{\delta} \rangle L / \lambda = 5 \cdot 10^{-4}$, предсказываемые гипотезой /9/, нетрудно получить энергетический спектр X-частиц на уровне Тяньшаньской высокогорной научной станции ФИАН $x = 700$ г/см². Поток таких частиц в вертикальном направлении на уровне Тянь-Шаня составляет

$\sim 8 \cdot 10^{-10} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1} \text{ стер}^{-1}$, т.е. достаточно мал, чтобы его можно было обнаружить в проведенных до сих пор измерениях. Так как в области энергий $E \leq 1$ Тэв α -частицы если и образуются, то практически все распадаются, поэтому почти весь поток состоит из частиц с энергией $E > 1$ Тэв.

Подземный ионизационный калориметр Тяньшаньской станции ФИАН расположен на глубине ~ 20 м в. э. и содержит в качестве поглотителя 425 г/см^2 свинца. Так как угловое распределение α -частиц расширяется по мере возрастания их энергии из-за уменьшения влияния распада, то эффективная светосила калориметра к регистрации таких частиц в интервале зенитных углов $0^\circ + 50^\circ$ увеличивается от $5,78 \cdot 10^4 \text{ см}^2 \text{ стер}$ при $E = 1$ Тэв до $9,51 \cdot 10^4 \text{ см}^2 \text{ стер}$ при $E = 10$ Тэв. Принимая пробег для поглощения α -частиц в грунте таким же, как и в воздухе, а в свинце в $A^{1/3}$ раз больше, получим интенсивность каскадов от α -частиц с энергией $E \geq 1$ Тэв и зенитным углом $\theta \leq 50^\circ$, ожидаемых в калориметре, $\sim 3 \cdot 10^{-3} \text{ час}^{-1}$. Их энергетический спектр представлен на рис. 1.

Результаты расчета не очень чувствительны к вариации параметров, входящих в гипотезу, тем более, что необходимость согласованного объяснения ряда экспериментальных фактов накладывает довольно жесткие требования на диапазон и характер возможных изменений этих параметров. Так например, необходимость объяснения углового распределения ливней, бедных мюонами, ограничивает диапазон возможных изменений α пределами $\alpha = 7 \div 30$. В этих пределах при постоянном потоке α -частиц на поверхности земли интенсивность каскадов в калориметре почти не претерпевает изменений, так как увеличение проникающей способности α -частиц одновременно увеличивает их поток под землей и снижает эффективность их регистрации калориметром. Возможное изменение критической энергии распада B ограничено рамками $B = 1,5 \div 6$ Тэв в связи с необходимостью объяснения результатов исследо-



Р и с. 1. Сравнение интенсивностей регистрации каскадов различной энергии, наблюдаемых на подземном ионизационном калориметре Тяньшаньской высокогорной научной станции ФИАН в интервале углов $0^\circ + 50^\circ$ (точки), с теоретически ожидаемыми в предположении о различном происхождении таких каскадов.

вания углового распределения мюонов с $E_{\mu} \geq 1$ Тэв /11/. Это изменение должно быть связано с изменением интенсивности генерации X-частиц, так как увеличение В ведет к увеличению роли распада в области $E \sim 1$ Тэв, где из эксперимента можно допустить лишь незначительную возможную примесь других механизмов генерации мюонов, отличных от π - μ и k - μ распадов. Чтобы не войти в противоречие с экспериментом, при увеличении В надо одновременно понизить интенсивность генерации X-частиц $\langle u^{\theta} \rangle$. Оба эти эффекта - понижение интенсивности генерации и увеличение роли распада - поведут к снижению потока X-частиц на уровне гор в области нескольких Тэв, следовательно, полученный энергетический спектр каскадов можно рассматривать как верхний возможный предел.

Неопределенность в характере взаимодействия X-частицы со свинцом тоже не может исказить полученный результат. Мы можем предположить, что большая проникающая способность X-частицы вызвана не ее пассивностью по отношению к сильным взаимодействиям, а малым коэффициентом неупругости в ее столкновениях с ядрами. Предполагая, например, что $K_X = k_{N-N}/M_X$ /14/, мы получим для $M_X = 5 \div 25$ Бэв и $k_N = 0,45$ величину $K_X = 0,09 \div 0,02$, что даст величину $\Lambda/\Lambda_X^{ns} = 1/[1 - (1 - K_X)^{\gamma}] = 7 \div 30$ при $\gamma = 1,6$. Это означает что сечение взаимодействия X-частицы с ядрами может быть почти таким же, как и у нуклонов, и эффективность calorиметра к регистрации таких частиц будет равна 1 вместо 0,22, как в расчете. Однако из-за малого коэффициента неупругости и недостаточной толщины calorиметра X-частицы будут оставлять в calorиметре не более $4 \pm 17\%$ своей энергии. Интенсивность каскадов с $E > 1$ Тэв будет определяться потоком X-частиц с $E_X \geq 6 \div 25$ Тэв, составляющим не более 16% от полного потока. Интенсивность каскадов и в этом случае не может быть выше той, которая рассчитана.

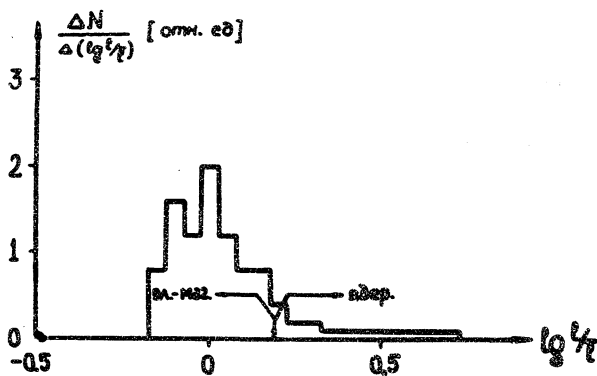
Сравнение рассчитанной и экспериментально полученной интенсивностей каскадов в области $E \geq 3$ Тэв, где наблюдается отклонение энергетического спектра каскадов от теоретически ожидаемого, исходя из обычного спектра мюонов, показывает, что проникновение X-частиц под землю и их взаимодействие с веществом калориметра вряд ли может полностью объяснить эффект. Даже по максимальным оценкам вклад таких каскадов в общую интенсивность не превышает $\sim 20\%$, в то время как для полного объяснения необходим вклад не менее 50% (рис. 1).

Однако сделанный вывод не закрывает возможности объяснения избытка каскадов с помощью гипотезы /9/. Причиной появления этого избытка могут быть не сами X-частицы, проникающие под землю, а мюоны распада, возникшие от этих частиц. Подгонка параметров гипотезы /9/ сделана таким образом, что наличие X-частиц, практически не искажая потока мюонов в области $E_{\mu} \approx 1$ Тэв, приводит к удвоению потока мюонов при $E_{\mu} \approx 10$ Тэв. Так как средняя энергия мюонов, ответственных за образование тормозных фотонов с $E > 3$ Тэв, как раз порядка 10 Тэв /15/, это значит, что количество электромагнитных каскадов с $E \geq 3$ Тэв при наличии X-частиц должно было бы примерно удвоиться по сравнению с ожидаемым, что и наблюдается на эксперименте (рис. 1). Доля ядерных каскадов должна была бы составлять $\sim 18\%$.

Проверить предположение о том, что каскады с $E \geq 3$ Тэв вызваны не взаимодействием X-частиц, а преимущественно взаимодействием мюонов, можно, изучая свойства этих каскадов. Исследования характеристик электромагнитных каскадов меньших энергий показали, что их средняя длина изменяется как $\bar{l}(E) = 104 + 25,6 \cdot \ln(E/0,1)$ /2/, а флуктуации этой длины вокруг среднего значения можно описать нормальным законом $dW/d\delta = (1/6\sqrt{2\pi}) \exp[-(\Delta\delta)^2/26^2]$ где $\delta = \ln(l/l_0)$, а $\sigma = 0,066$ /3/. Экстраполируя зави-

симости /2/ и /3/ на интервал энергий $E = 3 \div 6$ Тэв, мы должны ожидать, что средняя длина и флуктуации должны характеризоваться величиной $\bar{l} = 200 \pm 33$ г/см².

На рис. 2 приведено распределение длин, построенное для 25 каскадов с энергией $E = 3 \div 6$ Тэв. Вид



Р и с. 2. Распределение длин каскадов с энергией $E = 3 \div 6$ Тэв. Вертикальной стрелкой обозначена условная граница разделения электромагнитных и ядерных каскадов.

распределения наводит на мысль, что его можно разбить на две части (на рис. 2 граница разбиения указана стрелкой). Левая часть, в которую входит 21 каскад, подчиняется распределению, которое дает $\bar{l} = 193 \pm 37$ г/см² в хорошем согласии с ожидаемым для электромагнитных каскадов. В правой части заключены 4 каскада, длины которых превышают \bar{l} более чем на тройную среднеквадратичную ошибку и которые можно было бы приписать ядерным взаимодействиям. Таким образом, и характеристики каскадов в области $E = 3 \div 6$ Тэв, где наиболее сильно должно было бы чувствоваться влияние X-частиц, показывают, что свойства подавляющего большинства этих каскадов аналогичны их

свойствам в области меньших энергий, где каскады образуются только в результате взаимодействий мюонов.

Для решения вопроса о справедливости гипотезы /9/ необходимо такое улучшение статистики в области $E \geq 3$ Тэв, которое позволило бы делать определенные заключения об энергетическом спектре, угловом распределении и о характеристиках каскадов в этой области.

Поступила в редакцию
1 февраля 1971 г.

Л и т е р а т у р а

1. С. Н. Вернов, О. В. Веденеев, Ю. А. Нечин, Б. А. Хренов, Г. В. Христиансен. Proc. of Int. Conf. Cosm. Rays, London, 1965, v.2, 952.
2. Ю. А. Смородин. ЖЭТФ, 3, 197 (1966).
3. G. Castagnoli, E. Etim, P. Picchi. Lett. Nuovo Cim., 1, 197 (1969)
4. K. Sitte. Lett. Nuovo Cim., 1, 252 (1969)
5. H. Kasha, R. J. Stefanski. Phys. Rev., 172, 1297 (1968)
6. P. Franzini, S. Shulman. Phys. Rev. Lett., 21, 1013 (1968)
7. А. Д. Ерлыкин, А. К. Куличенко. Изв. АН СССР, сер. физ. 32, 444 (1968).
8. А. Д. Ерлыкин, А. К. Куличенко, С. К. Мачавариани, Р. А. Нам, В. И. Яковлев. Изв АН СССР, сер. физ. 32, 448 (1968).
9. J. Gawin, R. Maze, J. Wdowczyk. Доклад на Всесоюзной конференции по физике космических лучей. Москва, 1970 г.
10. M. Nagano, T. Hara, S. Kawaguchi, S. Mikamo, K. Suga, G. Tanahashi, M. Matano. INS, Rep. 147, 1970.

11. H. E. Bergeson, G. L. Bolingbroke, D. E. Groom, J. W. Keuffel. Доклад на Киевской конференции по физике высоких энергий, 1970 г.
12. А. Д. Ерлыкин, А. К. Куличенко, С. С. Мазниченко, С. К. Мачавариани, Э. А. Мешков. Труды Всесоюзной конференции по физике космических лучей, Москва, 1970 г. (в печати).
13. С. И. Никольский, Препринт ФИАН № 35, Москва, 1970 г.; Труды Всесоюзной конференции по физике космических лучей, Москва, 1970 г. (в печати).
14. R. K. Adair, N. J. Price. *Phys. Rev.*, 142, 844 (1966).
15. А. Д. Ерлыкин. Диссертация, ФИАН, 1968 г.