ТИК

ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК

Т. 61, № 6 СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ 1997

УДК 520.6.03 : 523.165

© 1997 г. Дж. АДАМС, Дж. ЛИ, В.И. ЗАЦЕПИН, М.И. ПАНАСЮК, Н.В. СОКОЛЬСКАЯ

СПЕКТР ВСЕХ ЧАСТИЦ ПЕРВИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ: ДАННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ТИК

Приведены экспериментальные данные о спектре энерговыделений в тонком ионизационном калориметре (ТИК), который был облучен летом 1994 г. на баллоне над Северной Канадой на глубине атмосферы 4 г · см$^{-2}$. Прибор стабильно работал в течение всего полета, продолжавшегося 75 ч. Зарегистрировано около двух миллионов событий с энерговыделением от 10 ГэВ до 20 ТэВ. Экспериментальные данные, возможно, свидетельствуют о существовании в первичных космических лучах двух потоков с разными спектральными индексами.

Введение

В области энергий меньше 1 ТэВ имеется много экспериментов, в которых спектры различных компонент ПКЛ были измерены с помощью различных электронных детекторов [1]. Однако не было ни одного эксперимента, где спектры всех компонент от протонов до железа были бы измерены с помощью одного инструмента. Кроме того, недостаточная светосила инструментов и ограниченное время экспозиции не позволили выполнить измерения в области энергий выше 1 ТэВ. Измерения в области энергий порядка ТэВ были выполнены с помощью инструментов, характеризующихся высоким энергетическим порогом (более 5 ТэВ) [4–5]. Из-за ограниченного времени экспозиции эти эксперименты также дали информацию в узком энергетическом интервале. Исключение составляет цикл экспериментов, выполненных на спутниках "Протон" [5], в которых были измерены спектры протонов и ядер гелия до энергий ~10 ТэВ, и спектр энерговыделений от всех частиц в широком интервале – от 50 до 10^6 ГэВ. Результаты по спектру протонов были подвергнуты критике из-за возможного искажения измерения заряда альбедными частицами из калориметра. Спектр всех частиц не мог быть искажен обратным током, и тем не менее в нем были отмечены две особенности: изменение наклона от $\gamma = 1{,}6$ до $\gamma = 1{,}8$ в области энергий $\geq$0,7 ТэВ и возврат к наклону ~1,6 при энергиях более нескольких ТэВ.

Мы приводим предварительные результаты баллонных измерений спектра всех частиц с помощью тонкого ионизационного калориметра (ТИК), выполненных с целью проверки результатов по спектру всех частиц, полученных в серии экспериментов "Протон 1–4".

Описание прибора и экспозиции

ТИК состоит из пяти стальных плит и пяти слоев сцинтилляторов. Каждая плита имеет размер 30,5 × 30,5 см^2 и толщину 6 см. Под каждой плитой расположен слой сцинтилляторов, состоящих из шести брусков размером 5 × 30,5 см^2 и толщиной 1,5 см. Под последним слоем сцинтилляторов располагается стальная плита толщиной 1,3 см. Свет из торцов сцинтилляторов выходит в два светорассеивающих диффузора,

оклеенных хорошо отражающей свет белой бумагой. В конце каждого диффузора находился фотоумножитель ФЭУ-49 с диаметром фотокатода 15 см. Сигналы с фотоумножителей суммировались. Если на выходах ФЭУ появлялись одновременно ($\tau \sim 1$ мкс) сигналы, превышающие 4 мВ, то суммарный сигнал измерялся и его амплитуда записывалась в соответствующий канал анализатора. ТИК набирал статистику в течение нескольких минут, после чего зарегистрированный спектр сигналов выводился на фототабло и фотографировался. Для увеличения надежности сигнал анализировался двумя 14-канальными анализаторами А и В. Динамический диапазон входных сигналов был 1500. Левая граница каждого следующего канала была в 2 раза выше предыдущего. Минимальный и максимальный сигнал составляли 8,76 и 13930 мВ для анализатора А и 15,48 и 18412 мВ для анализатора В. Для перекрытия этого динамического диапазона каждый анализатор имел два усилителя – грубый и чувствительный. После чувствительных усилителей сигналы регистрировались в каналах от А1 до А7 (входные сигналы от 8,76 до 801,4 мВ) и от В1 до В7 (входные сигналы от 15,48 до 1161,6 мВ). После грубых усилителей сигналы регистрировались в каналах от А8 до А14 (входные сигналы от 130 до 13930 мВ) и в каналах от В8 до В14 (входные сигналы от 197 до 18412 мВ), т.е. диапазоны чувствительного и грубого усилителя частично перекрывались. Каналы А7, А14, В7 и В14 были интегральными. Границы каналов были измерены с погрешностью не более ± 2 канала стандартного 4096-канального анализатора. Границей канала считался сигнал, регистрируемый каналами анализаторов ТИК с вероятностью 50%, определявшейся с помощью измерителя отношений. Была измерена зависимость границ каналов от температуры в диапазоне от –30 до +40° С. Границы каналов от А3 до А14 и от В3 до В14 имеют практически одинаковую температурную зависимость во всем исследованном диапазоне температур. Только каналы А1, А2, В1 и В2 имели отличающуюся от других температурную зависимость в области температур <5° С.

В августе 1994 г. ТИК летал в течение 75 ч над Северной Канадой на глубине от 4 г $\cdot$ см$^{-2}$ днем до 8 г $\cdot$ см$^{-2}$ ночью. В анализ была включена информация, полученная за 69 ч полета. Живое время набора статистики составило 64,9 ч. В полете чередовались двух- и шестиминутные периоды набора статистики. Эти два режима были сделаны для контроля переполнения памяти. За весь полет переполнения памяти не было ни в одном из каналов. Измерены 482 двухминутных и 483 шестиминутных спектра. Зарегистрировано более $1{,}94 \cdot 10^6$ событий, полученных с помощью анализатора А. Анализатор В работал нестабильно и здесь рассматриваться не будет.

Геометрический фактор прибора в изотропном потоке равен 1,04 м^2 $\cdot$ ср, соответственно фактор экспозиции составил 67,5 м^2 $\cdot$ ср $\cdot$ ч.

Калибровка на ускорителе

После полета ТИК был прокалиброван в Брукхейвенской национальной лаборатории США на пучке ядер золота с импульсом 2,29 ТэВ $\cdot$ с$^{-1}$. Пучок ионов падал нормально к плоскости сцинтилляторов в центре прибора. Пик амплитудного распределения сигналов, измеренного с помощью многоканального анализатора, находился на 500 мВ. Расчет прохождения ядер золота через ТИК, выполненный по программе GEANT, будет описан далее в разделе Моделирование. Максимум расчетного распределения энерговыделений приходится на 785 ГэВ. Таким образом, при калибровке была определена связь между выделенной в приборе энергией и амплитудой электрического сигнала: 1 мВ = 1,57 ГэВ.

Экспериментальные данные и моделирование

Для проверки стабильности работы прибора в полете все время экспозиции было разделено на 23 трехчасовых периода. Так как скорости счета зависят от высоты и от температуры, то были определены отношения трехчасовых скоростей счета в соседних каналах. Результаты показаны в таблице, где $\langle R \rangle$ – среднее значение этих отноше-

N_i/N_{i+1}	$\langle R \rangle$	δ_{exp}, %	δ_{stat}, %	N_i/N_{i+1}	$\langle R \rangle$	δ_{exp}, %	δ_{stat}, %
N_1/N_2	3,070	7,5	0,7	N_6/N_7	2,36	22	19
N_2/N_3	4,206	2,0	1,64	N_8/N_9	6,706	11	9,2
N_3/N_4	3,992	2,53	3,30	N_9/N_{10}	4,41	21	20
N_4/N_5	3,775	7,5	6,4	N_{10}/N_{11}	4,47	41	39
N_5/N_6	3,50	17	12				

ний, δ_{exp} – экспериментальная, а δ_{stat} – статистическая относительные ошибки этих трехчасовых отношений. Видно, что экспериментальный разброс превышает ожидаемый статистический только в первом канале, где экспериментальная относительная ошибка составляет 7,5%, а статистическая 0,7%. Причиной, по-видимому, является зависимость порога дискриминаторов от температуры. Таким образом, в течение всего полета прибор работал стабильно. За исключением первого канала, инструментальный разброс меньше статистического. Темп счета в первом канале искажен из-за близкого порога регистрации событий.

На рис. 1 показан измеренный в эксперименте спектр энерговыделений. Ошибки – статистические. На том же рисунке приведен спектр энерговыделений, измеренный на спутниках "Протон 1–4" [5], нормированный по оси ординат к данным ТИК. Видно, что в эксперименте ТИК подтверждается измеренная в [5] особенность спектра, состоящая в переходе от крутого спектра к более пологому в области энерговыделений около 300 ГэВ. Для восстановления первичного спектра авторы [5] сместили измеренный спектр энерговыделений по энергетической шкале, используя коэффициент, не зависящий от энергии. Для тонкого калориметра, каким является ТИК, для восстановления первичного спектра необходимо моделирование преобразования первичной энергии в энергию, измеряемую в приборе.

Моделирование было выполнено по программе GEANT (версия 3.21). В качестве генератора адронных взаимодействий была использована программа FLUKA. В качестве первичных частиц рассматривались протоны, ядра азота и ядра золота (для калибровочного эксперимента). Для расчета прохождения ядер использовалась простая модель, в которой ядро представляло собой сумму независимо взаимодействующих в приборе Z протонов и $(A - Z)$ нейтронов.

Расчет спектров энерговыделений проведен для изотропного потока первичных частиц, а кинетические энергии первичных частиц были распределены по степенному спектру с показателем $\gamma = 1,6$. Результаты моделирования для спектра протонов приведены на рис. 1 вместе с экспериментальным спектром энерговыделений.

Обсуждение полученных результатов

Измеренный спектр энерговыделений не является степенным: "крутой" начальный участок в области энерговыделений от 30 до 250 ГэВ, где $\gamma = 1,83 \pm 0,001$, переходит в более "пологий" участок в области энерговыделений >400 ГэВ, где $\gamma = 1,74 \pm 0,03$.

Расчетный спектр энерговыделений, полученных из степенного первичного спектра с $\gamma = 1,6$, также не является степенным. Он имеет практически такой же, как и экспериментальный спектр, наклон в области энерговыделений <100 ГэВ, но более крутой наклон в области >100 ГэВ. Если это различие в области >100 ГэВ реально, то оно означает, что спектр всех частиц не является степенным. Мы восстановили спектр всех частиц, исходя из двух предположений.

1. Различие между измеренным и расчетным спектрами объясняется недостаточной статистической точностью как расчетного, так и измеренного спектров. Моделирование показало, что показатель спектра энерговыделений в ТИК в первом приближении круче показателя энергетического спектра на величину $\Delta\gamma = 0,2 \pm 0,01$, если $\gamma = 1,6$. Это означает, что между средней по спектру энергией частиц и энергией

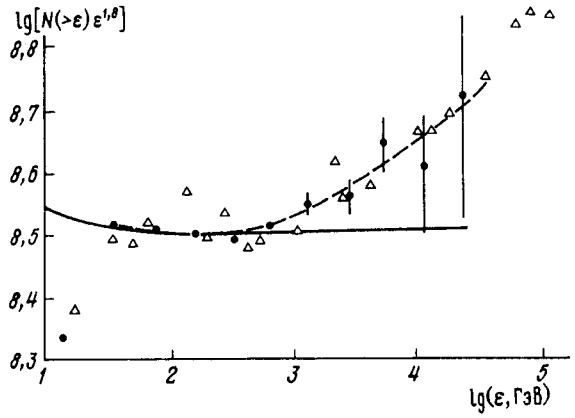

Рис. 1. Интегральный спектр энерговыделений в тонком ионизационном калориметре. ● – данные ТИК, △ – данные экспериментов "Протон 1–4"; сплошная кривая – ожидаемый спектр энерговыделений для степенного спектра протонов с показателем 1,6; штриховая кривая – описание экспериментальных данных суммой двух степенных спектров (см. текст)

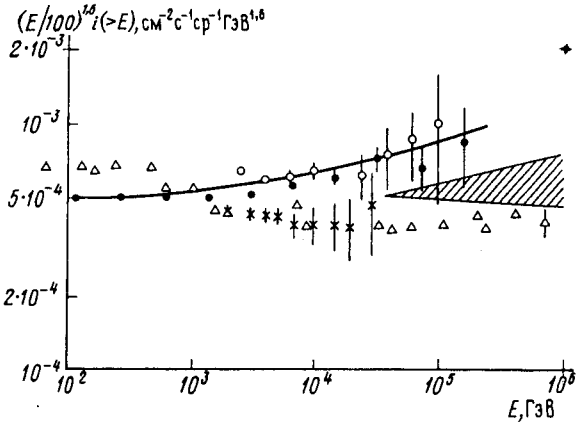

Рис. 2. Спектр всех частиц: ● – эксперимент ТИК, × – эксперимент "Сокол" [6], ○ – эксперимент "Сокол" [7], △ – эксперименты "Протон 1–4" [5]; заштрихованная область – данные JACEE [3]; сплошные кривые – описание данных ТИК суммой двух степенных спектров (см. текст)

созданных ими каскадов имеет место следующая связь:

$$E = a\varepsilon^{1+\Delta\gamma/\gamma} = a\varepsilon^{1,8/1,6},$$

где ε – энерговыделение в ГэВ, а a = 2,1 (из моделирования). Используя эту зависимость, можно преобразовать измеренный спектр энерговыделений в энергетический спектр всех частиц. Результат показан на рис. 2 вместе с данными других авторов. Интенсивность первичных частиц связана с интенсивностью каскадов той же энергии следующим образом: $I(>E) = i(>E)k(E)$. Значения k зависят от типа первичной частицы. Восстановленная таким образом интенсивность оказалась в 1,7 раза выше известной из литературы. Причины этого нам пока не известны, поэтому на рис. 2 мы пронормировали наши данные к литературным в области около 100 ГэВ.

2. Предположим теперь, что наблюдаемые особенности спектра энерговыделений обусловлены не недостатком статистики в расчете и эксперименте, а физическими причинами.

В связи с этим заметим, что спектр энерговыделений с высокой точностью может быть представлен суммой степенных спектров:

$$i(>\varepsilon) = a\varepsilon^{-\gamma_1} + b\varepsilon^{-\gamma_2}$$

с параметрами $a = 6{,}67 \cdot 10^6$ м$^{-2} \cdot$ ч$^{-1} \cdot$ ср$^{-1}$, $\gamma_1 = 1{,}96$, $b = 7{,}04 \cdot 10^5$ м$^{-2} \cdot$ ч$^{-1} \cdot$ ср$^{-1}$, $\gamma_2 = 1{,}6$. Это представление дает превосходное описание экспериментальных данных (с точностью в несколько процентов при тысячекратном изменении энергии). Если учесть инструментальное искажение спектров, то для спектра всех частиц получим следующее описание: $I(>E) = AE^{-1,7} + BE^{-1,4}$. Интенсивности этих компонентов также не могут быть определены из эксперимента ТИК однозначно, так как они зависят от средних атомных чисел компонент. Если, например, "крутая" компонента состоит из протонов и ядер гелия в пропорции 2 : 1, а "пологая" компонента из ядер со средней массой 14 m_p, то значения коэффициентов после приведения к границе атмосферы будут: $A = 3{,}0 \cdot 10^7$ м$^{-2} \cdot$ ч$^{-1} \cdot$ ср$^{-1}$, $B = 3{,}6 \cdot 10^6$. Рассчитанный таким образом спектр показан сплошной кривой на рис. 2.

Для получения окончательных выводов из этого эксперимента требуется увеличение статистики в эксперименте и улучшение точности расчета.

Авторы благодарят проф. Н.Л. Григорова, по инициативе и под руководством которого был создан калориметр ТИК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Swordy S.P.* // Proc. 23rd ICRC. Calgary. 1993. V. 2. P. 243.
2. *Иваненко И.П., Григоров Н.Л., Басина Ю.В. и др.* // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1987. Т. 51. № 10. С. 1781.
3. *Asakimori K., Burnett T.H., Cherry M.L. et al.* // Proc. 23rd ICRC. Calgary. 1993. V. 2. P. 25.
4. *Зацепин В.И., Лазарева Т.В., Сажина Г.П., Сокольская Н.В.* // ЯФ. 1994. Т. 57. С. 684.
5. *Григоров Н.Л., Нестеров В.Е., Рапопорт И.Д. и др.* // ЯФ. 1970. Т. 11. С.1058.
6. *Grigorov N.L.* // Proc. 23st ICRC. Adelaide. 1990. V. 3. P. 73.
7. *Ivanenko I.P., Shestoperov V.Ya., Chikova L.O. et al.* // Proc. 23rd ICRC. Calgary. 1993. V. 2. P. 17.

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

Военно-морская исследовательская
лаборатория, США

Университет Джорджа Масона, США