

УДК 523.165

О СПЕКТРЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ $10^{11} - 10^{13}$ эВ

Ю. И. Стожков, Н. Л. Григоров¹

Проведен детальный анализ энергетических спектров всех частиц галактических космических лучей $J(E)$, измеренных прибором АГИС и опубликованных в [7 – 9]. Показано, что в представлении $J(E) \cdot E^\gamma$ в интервале энергий (0.1 – 10) ТэВ все три спектра, представленные в этих работах, имеют вид "ступеньки". Вместе с ранее опубликованными данными, полученными в экспериментах на ИСЗ "Протон" и в баллонном полете прибора ГИК, результаты работ [7 – 9] исключают описание спектра всех частиц степенным законом в интервале энергий (0.1 – 10) ТэВ.

Вопрос о форме энергетического спектра галактических космических лучей (ГКЛ) имеет первостепенное значение, т.к. напрямую связан с проблемой происхождения космических лучей и их распространения в межзвездной среде. В области энергий частиц $E_0 > 10^{11}$ эВ, где солнечная модуляция практически отсутствует, обычно отмечают две особенности в энергетическом спектре ГКЛ. Первая: при энергии частиц $E_0 = (3 - 5) \cdot 10^{15}$ эВ спектральный индекс меняется с $(\gamma + 1) = 2.6$ до $(\gamma + 1) \sim 3.2$, при этом в спектре образуется "колени" [1]. Вторая: возможное обрезание спектра ГКЛ при $E_0 \sim 5 \cdot 10^{19}$ эВ в результате их взаимодействия с реликтовыми и звездными фотонами. Экспериментально существование такого обрезания пока не доказано [2].

Мы утверждаем, что существует и третья особенность в спектре ГКЛ, выражающаяся в увеличении γ на ~ 0.2 в области энергий $E_0 \approx (1 - 10) \cdot 10^{12}$ эВ по сравнению

¹Научно-исследовательский институт им. Д. В. Скобельцына, МГУ, Москва.

с его значением вне этой области. Эта особенность имеет принципиальное значение в связи с двумя обстоятельствами. Во-первых, она противоречит представлению о чисто степенном виде спектра ГКЛ в области энергий от $E_0 \approx 10^{11}$ эВ до $E_0 \approx 10^{15}$ эВ [3, 4]. Во-вторых, сведения о показателе спектра и составе ГКЛ в этой области энергий будут крайне необходимы для решения проблемы "колена", когда появятся прямые измерения в области энергий $E_0 \approx (1 - 10) \cdot 10^{15}$ эВ.

Этих причин достаточно, чтобы попытаться понять, что же происходит со спектром всех частиц в ТэВ-ной области энергий.

Прямые измерения спектра всех частиц в области энергий $E = (0.1 - 100)$ ТэВ. Впервые прямые измерения спектра всех космических лучей в ТэВ-ной области энергий были проведены на ИСЗ "Протон" в 1965 - 1968 гг. с помощью приборов СЭЗ-14 и СЭЗ-15 [5]. В этих приборах измерялось энерговыделение в ионизационных калориметрах (ИК) частицами космических лучей, падающих изотропно на прибор. При этом оказалось, что спектральный индекс $(\gamma + 1)$ потока всех частиц $J(E_0)$ равен ~ 2.6 в областях энергий частиц $E_0 < 1$ ТэВ и $E_0 > (5 - 10)$ ТэВ, а в области $1 \leq E_0 \leq (5 - 10)$ ТэВ он равен $\gamma + 1 = (2.9 - 3.0)$. Если величину $J(E_0)$ умножить на $E_0^{2.6}$, то эта функция будет выглядеть как ступенька (см. рис. 1).

Измерения на ИСЗ "Протон", выполненные в 1965 - 1968 гг., оставались единственными в течение 25 лет(!). В 1996 г. на баллонах были проведены измерения энерговыделений всех частиц в тонком ионизационном калориметре (прибор ТИК) [6]. Из рис. 1 видно, что данные прибора ТИК показывают ту же самую нерегулярность в спектре всех частиц, что и данные спутниковых экспериментов.

Недавно (в 2001 и 2003 гг.) были опубликованы предварительные данные о спектрах всех частиц, измеренных прибором АТИС в 2-х экспериментах на баллонах [7 - 9]. Прибор АТИС включал в себя ионизационный калориметр (ИК), выполненный из тяжелых сцинтилляторов ВГО. Изменялось энерговыделение всех частиц в ИК, которое сопровождалось сигналом в верхнем сцинтилляторе. Верхний сцинтиллятор находился под детектором заряда, и это обстоятельство за счет частиц обратного тока могло несколько повлиять на величину измеряемого спектрального индекса всего потока ГКЛ.

В работах [7, 8] спектры всех частиц представлены зависимостями темпа счета $dN/d(\lg E)$ от выделенной в ИК энергии E . Энергетические интервалы были выбраны достаточно малыми, так что соседние точки сливались в сплошную линию. Т.к. статистическая точность каждой точки была невелика, это привело к тому, что, уже начиная с $E \sim 1$ ТэВ, статистические ошибки полностью завуалировали небольшие изменения

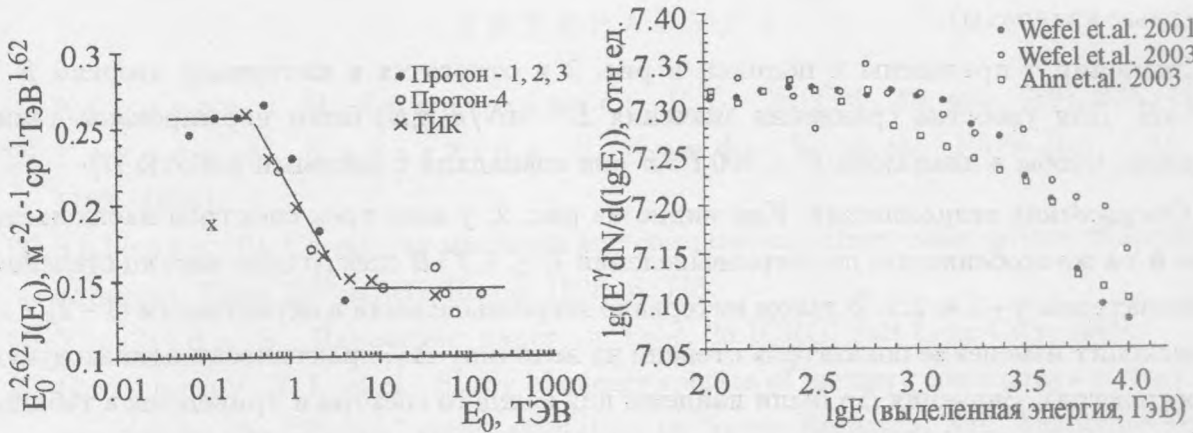


Рис. 1. Дифференциальный энергетический спектр всех частиц космических лучей $J(E_0)$, умноженный на $E_0^{2.62}$ (значения приведены в относительных единицах). Данные получены в экспериментах на спутниках "Протон-1, 2, 3, 4" и на высотном аэростате (прибор ТИК) ошибки данных составляют 5 – 10%. Данные прибора ТИК приведены в зависимости от энергии, выделенной частицей в ионизационном калориметре, умноженной на постоянный множитель. Прямые линии показывают поведение спектра в различных интервалах энергий частиц.

Рис. 2. Значения $E^\gamma \cdot dN/d(\lg E)$ для всех частиц в зависимости от энергии E , выделенной частицей в калориметре прибора АТИС. Эти значения даны в относительных единицах и получены из данных экспериментов 2001 и 2003 гг.: • – Wefel et al., 2001 г., $\gamma = 1.59$ [7]; ○ – Wefel et al., 2003 г., $\gamma = 1.50$ [8]; □ – Ahn et al., 2003 г., $\gamma = 1.51$ [9].

наклона спектра в разных энергетических интервалах и создали иллюзию существования чисто степенного спектра всех частиц в области энерговыделений $E \geq 0.1$ ТэВ.

Чтобы выяснить истинный вид спектра, приведенного в [7, 8], необходимо было существенно увеличить статистику числа частиц в каждом энергетическом интервале, т.е. расширить энергетические интервалы. Для этого кривые, отображающие спектры всех частиц и приведенные на рис. 5 и 4 в работах [7] и [8] соответственно, были оцифрованы, т.е. получено число частиц в достаточно узких энергетических интервалах. После этого энергетические интервалы были увеличены путем суммирования числа событий в нескольких соседних интервалах. Таким образом, статистическая точность была увеличена в несколько раз. Полученные значения $dN/d(\lg E)$ были умножены на величину E^γ и значения $E^\gamma \cdot dN/d(\lg E)$ как функция выделенной энергии изображены на рис. 2.

Спектр всех частиц также приведен в работе [9], в которой на рис. 2в он представлен в виде точек. После оцифровки точек этот спектр, умноженный на E^γ , показан на рис. 2

(светлые квадраты).

Значения γ приведены в подписи к рис. 2 и относятся к интервалу энергий $E < 10^{12}$ эВ. Для удобства сравнения значения $E^\gamma \cdot dN/d(\lg E)$ были нормированы таким образом, чтобы в диапазоне $E < 800$ ТэВ они совпадали с данными работы [7].

Обсуждение результатов. Как видно из рис. 2, у всех трех спектров наблюдается одна и та же особенность: до энергывыделений $E \leq 1$ ТэВ спектр всех частиц степенной с показателем $\gamma + 1 \approx 2.5$. В узком интервале энергывыделений в окрестности $(1-2)$ ТэВ происходит изменение показателя степени на величину $\Delta\gamma$, практически одинаковую во всех спектрах. Значения $\Delta\gamma$ были найдены для каждого спектра и приведены в таблице. По данным прибора АТИС среднее значение $\Delta\gamma$ равно $(\Delta\gamma)_{cp.} = 0.21 \pm 0.04$.

Т а б л и ц а

*Величина изменения показателя спектра всех частиц $\Delta\gamma$,
полученная из данных разных экспериментов*

Прибор	$\Delta\gamma^*$	Ссылка
СЭЗ-14 + СЭЗ-15	0.3	[5]
ТИК	0.09	[6]
АТИС-2001	0.28	[7]
АТИС-2003 (а)	0.15	[8]
АТИС-2003 (б)	0.20	[9]

*) ошибка определения $\Delta\gamma$ в разных спектрах составляет $\sim (0.05 - 0.07)$

Спектры всех частиц, представленные на рис. 2, как качественно, так и по количественным характеристикам совпадают и имеют характерную закономерность, которая заключается в следующем:

1) Спектр всех частиц имеет степенной вид со спектральным индексом $\gamma + 1 \approx 2.5$ при $E \leq 1$ ТэВ и $E \geq 10$ ТэВ, а в промежутке $1 \leq E < 10$ ТэВ спектральный индекс на (0.21 ± 0.04) больше и равен $\gamma + 1 \approx 2.7$.

2) Спектр всех частиц в представлении $E^\gamma \cdot J(E)$ имеет вид "ступеньки", высота которой около 1.5. Причем, величина $E^\gamma \cdot J(E)$ является постоянной при $E < 1$ ТэВ (см. рис. 1 и 2) и при $E \geq (5-10)$ ТэВ (см. рис. 1). Иными словами, во всем энергетическом интервале от 10^{11} до 10^{14} эВ спектр не является чисто степенным.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Куликов Г. В., Христиансен Г. Б. ЖЭТФ, **35**, вып. 3(9), 635 (1958).
- [2] Takeda M., Nuyashida N., Kondo K., et al., Phys. Rev. Lett., **81**, 1163 (1998).
- [3] Shibata T. Cosmic ray spectrum and composition; direct observations. Rapporteur paper, in: Proc. 24th ICRC, Rome, 1995, p. 713.
- [4] Yoshida S. Rapporteur paper, in: Proc. 26 ICRC, Salt Lake City, 1999.
- [5] Grigorenko N. L. et al. Study of energy spectra of primary cosmic rays at very high energies on the "Proton" series satellites, in: Space Research, XII, Akademie-Verlag, Berlin, 1972, p. 1617.
- [6] Адамс Дж. и др. Изв. АН СССР, сер. физ., **61**, 1181 (1997).
- [7] Wefel J. P. for ATIC collaboration. The ATIC experiment: first balloon flight, in: Proc. of 27th ICRC, Germany, Hamburg, OG, 2001, p. 2111.
- [8] Wefel J. P. for ATIC collaboration. The ATIC science flight in 2002 – 2003; Description and preliminary results, in: Proc. of 28th ICRC, Japan, Tsukuba, OG, 2003, p. 1849.
- [9] Ahn H. S. et al. for ATIC collaboration. ATIC experiment: preliminary results from the flight in 2002, in: Proc. of 28th ICRC, Japan, Tsukuba, OG, 2003, p. 1853.

Поступила в редакцию 5 февраля 2004 г.