

УДК 539.1

## ФОРМА СПЕКТРА И ВОЗМОЖНОЕ ПРОИСХОЖДЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

А. В. Урысон

*Проанализирована сложная форма спектра космических лучей, регистрируемых наземными установками в области энергий  $10^{17} - 10^{20}$  эВ. Показано, что в области  $10^{17} - 4 \cdot 10^{19}$  эВ спектр, по-видимому, формируется во взаимодействиях внегалактических космических лучей с реликтовым излучением. При более высоких энергиях спектр, по-видимому, не имеет чернотельного обреза.*

Происхождение космических лучей сверхвысоких энергий ( $E > 10^{17}$  эВ) до конца не выяснено. Экспериментальные данные свидетельствуют, что космические лучи с энергией  $E \approx 10^{17}$  эВ являются, по-видимому, галактическими, а в области  $E > 4 \cdot 10^{19}$  эВ – внегалактическими [1 – 3]. Если это так, то их спектр может иметь чернотельное обрезаение [4, 5]: регистрируемый поток частиц с энергией  $6 \cdot 10^{19}$  эВ будет вдвое меньше, чем ожидается из степенной экстраполяции спектра вследствие взаимодействий космических лучей с реликтовыми фотонами в межгалактическом пространстве. Однако если источники протонов удалены от нас не дальше, чем на 40 – 50 Мпк, чернотельное обрезаение будет отсутствовать, т.к. такие расстояния преодолевают практически свободно протоны любых энергий вплоть до  $E \approx 10^{22}$  эВ [6]. В работе [7] было показано, что основными источниками протонов с энергией  $E > E_{bb} \approx 3,2 \cdot 10^{19}$  эВ являются, по-видимому, ядра активных галактик, удаленные от нас не дальше, чем на 40 Мпк, если постоянная Хаббла равна  $75 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})$ . В таком случае спектр протонов не имеет чернотельного обрезаения. В настоящее время экспериментальные данные, полученные на разных установках, не подтверждают и не опровергают наличие чернотельного обрезаения.

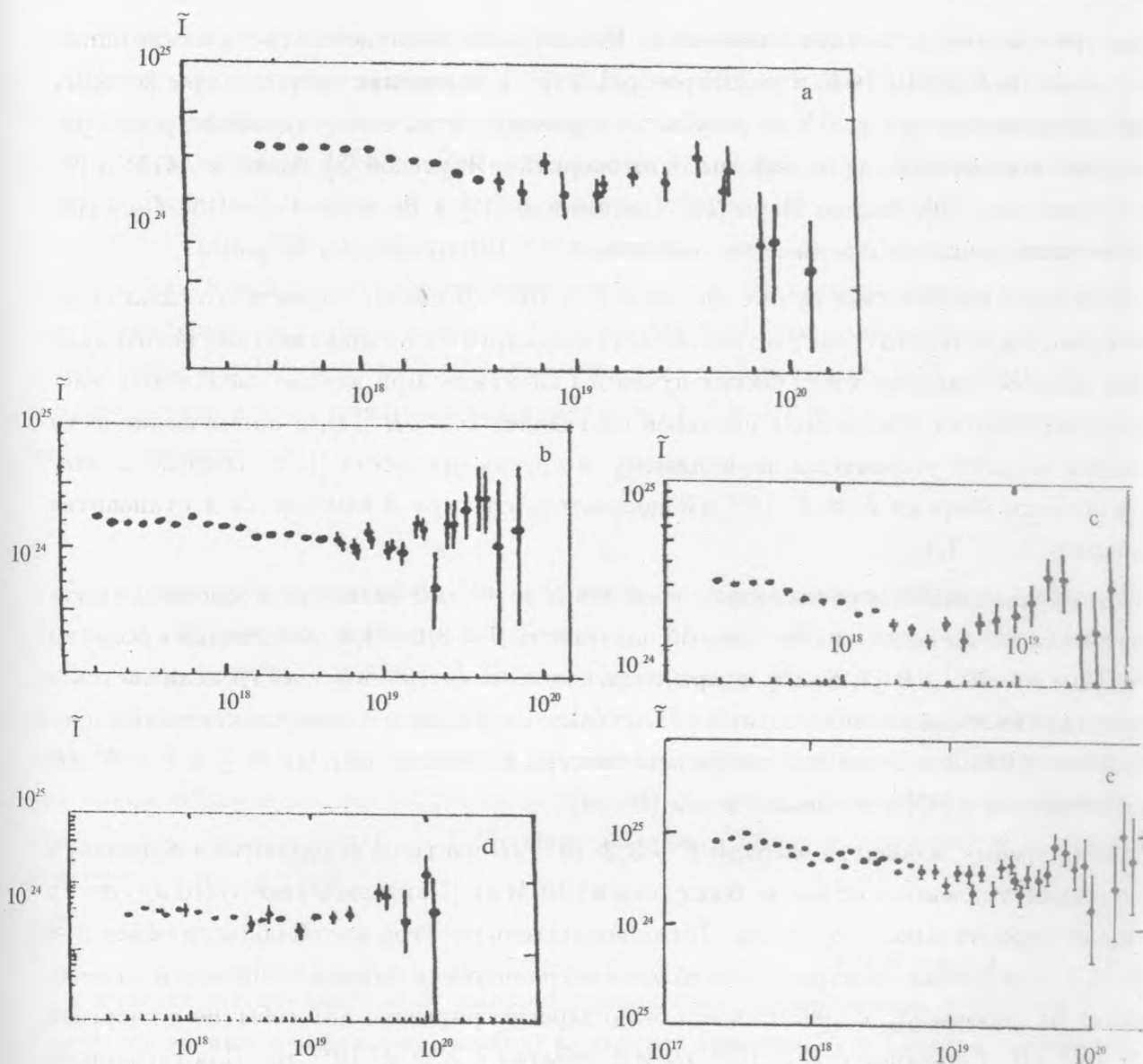


Рис. 1. Спектры космического излучения ( $\tilde{I} = I(E)E^3$ ,  $m^{-2}c^{-1}sr^{-1}\text{эВ}^2$ ) при  $E > 10^{17}$  эВ по измерениям на установках: а) Якутской [8], б) Акено и AGASA [9], с) Мушиный глаз [10], д) Хавера Парк [11], е) Сиднейской [12]. По оси абсцисс – энергия  $E$  в электрон-вольтах.

В данной работе мы проанализировали спектр космических лучей в области энергий  $E > 10^{17}$  эВ для того, чтобы выяснить их происхождение.

Спектр космических лучей в этой области имеет сложную форму. При энергии  $E \approx 5 \cdot 10^{17}$  эВ наклон спектра возрастает, а в области  $E \approx 10^{19}$  эВ уменьшается –

в спектре появляется пологая компонента. Несмотря на большие статистические ошибки в области  $E \geq 10^{19}$  эВ и некоторое различие в значениях энергии, при которых изменяется наклон спектра, этот результат подтвержден на всех установках, регистрировавших космические лучи сверхвысоких энергий – Якутской [8], Акено и AGASA [9], Мушинный глаз [10], Хавера Парк [11], Сиднейской [12] и Волкано Ренч [13]. Спектры космических лучей, измеренные на установках [8 – 12], приведены на рис. 1.

Поскольку космические лучи с энергией  $E < 10^{17}$  эВ имеют скорее всего галактическое происхождение, то спектр в этой области формируется в галактических источниках и при распространении космических лучей в Галактике. При взрыве сверхновых максимальная энергия ускоряемых протонов составляет  $10^{15}$  эВ [14], и космические лучи больших энергий ускоряются, по-видимому, в других процессах [1, 3]. Видимо, поэтому в области энергий  $E \approx 3 \cdot 10^{15}$  эВ показатель спектра  $\beta$  изменяется и становится равным  $\sim 3,0 - 3,1$ .

Мы предположили, что частицы с энергией  $E > 10^{17}$  эВ являются в основном внегалактическими, их спектр имеет единый показатель  $\beta \approx 3,0 - 3,1$ , найденный в области  $E \approx (2 - 4) \cdot 10^{17}$  эВ [3, 8, 10], а при энергиях  $E > 4 \cdot 10^{17}$  эВ спектр искажается в результате взаимодействия частиц с реликтовым излучением в межгалактическом пространстве. (Возможное изменение формы спектра в области энергий  $E \leq 3,2 \cdot 10^{19}$  эВ было отмечено в [15] и исследовалось в [16, 17].)

По-видимому, в области энергий  $E > 3,2 \cdot 10^{19}$  эВ частицы ускоряются в основном в источниках, удаленных от нас не более, чем на 40 Мпк [7], и вследствие этого их спектр не имеет чернотельного обрезания. Тогда показатель спектра в этой области равен  $\beta \approx 3,0 - 3,1$ . Для оценки спектрального индекса воспользуемся сводкой экспериментальных данных из работы [3]: к 1993 г. всего было зарегистрировано 881 событие с энергией  $E \geq 10^{19}$  эВ, 7 событий с  $E \geq 10^{20}$  эВ и 2 события с  $E \geq 2 \cdot 10^{20}$  эВ. Для степенного спектра с числом частиц  $N_1(> E_1)$  и  $N_2(> E_2)$ , энергии которых превышают  $E_1$  и  $E_2$ , выполняется соотношение  $N_1(\geq E_1)/N_2(\geq E_2) = (E_1/E_2)^{\beta+1}$ , и из него получаем  $\beta \approx 3,1$  при  $E_1 = 10^{19}$  эВ,  $E_2 = 10^{20}$  эВ и  $\beta \approx 3,0$ , если  $E_2 = 2 \cdot 10^{20}$  эВ.

Эта оценка, возможно, не совсем корректна, т.к. некоторые из 881 события имеют энергию в узком интервале  $\sim 10^{19}$  эВ и составляют пологую компоненту. Тем не менее, она будет использована в дальнейшем. Мы привели ее еще и потому, что в [3] на основе этих же данных был сделан вывод о возможном существовании чернотельного обрезания: в ней число зарегистрированных событий с энергией  $E \geq 10^{20}$  эВ сопоставлялось с числом ожидаемых событий в предположении, что показатель спектра при

таких энергиях совпадает с показателем пологой компоненты.

Пологую компоненту в области  $10^{19} < E < 4 \cdot 10^{19}$  эВ можно объяснить так. Частицы с энергией, превышающей чернотельное обрезание ( $E > E_{bb}$ ), распространяющиеся от источников с красными смещениями  $z > 0,0092$ , будут взаимодействовать с реликтовым излучением до тех пор, пока их энергия не уменьшится до величины  $E \approx (3,2 - 5,0) \cdot 10^{19}$  эВ. Частицы таких энергий могут не испытать ни одного взаимодействия в межгалактическом пространстве, т.к. их пробеги в поле реликтового излучения будут достаточно велики -  $\lambda > 1000$  Мпк [6]. Это приведет к тому, что протоны с энергией  $E > 3,2 \cdot 10^{19}$  эВ "перекачаются" в область  $E \approx (3,2 - 5,0) \cdot 10^{19}$  эВ, и в результате наклон спектра в ней изменится от  $\beta \approx 3,0 - 3,1$  до  $\beta_1$ , определяемого из соотношения

$$\int_{E_{bb}}^{\infty} E^{-\beta} dE = \int_{E_{bb}}^{E_3} E^{-\beta_1} dE,$$

где  $E_3$  - верхняя граница диапазона энергий пологой компоненты. Отсюда найдем величину  $\beta_1$ . Измеренное значение  $E_3$  составляет  $\sim 4 \cdot 10^{19}$  эВ, а энергия частиц определяется с ошибкой 20 - 30% [8, 10]. Поэтому мы оценили показатель  $\beta_1$  для нескольких значений  $E_3$  в интервале  $4 \cdot 10^{19} < E_3 < 5 \cdot 10^{19}$  эВ и нескольких значений  $\beta$  в интервале  $3,0 < \beta < 3,1$ . Вычисленные значения  $\beta_1$  приведены в табл. 1. Из нее видно, что таким образом можно получить показатель  $\beta_1$ , который согласуется с наклоном измеренного спектра при  $E \sim 10^{19}$  эВ, и объяснить пологую компоненту в области  $E \approx (3,2 - 5,0) \cdot 10^{19}$  эВ.

Т а б л и ц а 1

Вычисленный показатель  $\beta_1$  пологой компоненты при различных значениях (в пределах экспериментальных ошибок) ее верхней границы  $E_3$  и наклона спектра  $\beta$

$\beta$	$E_3$ , эВ	$\beta_1$
3,1	$4,5 \cdot 10^{19}$	2,6
3,05	$4,8 \cdot 10^{19}$	2,65
3,05	$4,9 \cdot 10^{19}$	2,7
3,0	$4,9 \cdot 10^{19}$	2,6

Существование в спектре пологой компоненты такой природы предсказывалось в работах [15 - 17]. Следуя результатам [17], можно ожидать, что в спектре с показателем  $\beta \approx 3,0 - 3,1$  пологая компонента при энергиях  $2 \cdot 10^{18} - 3 \cdot 10^{19}$  эВ формируется



космическими лучами, ускоренными в источниках с  $z < 0,2$ , т.е. удаленных от нас на расстояния до  $\sim 10^3$  Мпк.

Выемка в спектре в области  $5 \cdot 10^{17} - 2 \cdot 10^{19}$  эВ может быть обусловлена следующими причинами [17]. Во-первых, в спектре частиц, ускоренных в источниках с  $z < 1$ , она может появиться в области  $E < 10^{19}$  эВ вследствие того, что частицы с  $E = 2 \cdot 10^{18} - 3 \cdot 10^{19}$  эВ теряют энергию, рождая  $e^+e^-$ -пары в поле реликтового излучения. Во-вторых, независимо от этого процесса, выемка образуется в области "сшивания" спектра с более пологой компонентой.

По измерениям [10, 18] состав космических лучей в области  $E > 4 \cdot 10^{17}$  эВ изменяется, и в [10] это интерпретируется как переход от галактических космических лучей к внегалактическим. Если это так, то выемка в спектре образуется вследствие обеих причин.

По [17] спектр космических лучей имеет такую форму, если их источники заполняют Вселенную неоднородно. Поэтому распределение по небесной сфере направлений прихода ливней с энергиями  $10^{18} - 5 \cdot 10^{19}$  эВ можно будет использовать для поиска возможной неоднородности в распределении источников космических лучей по небу на масштабах до  $\sim 10^3$  Мпк. (Неоднородности такого масштаба в распределении активных галактик были обнаружены в работах [22, 23].)

Полученные выводы могут быть проверены в дальнейших измерениях спектра космических лучей в области  $E > 10^{17}$  эВ на установках [8 - 11], а также на будущих установках [19, 20] и ШАЛ-1000 [21], которые будут иметь значительно лучшее энергетическое и угловое разрешение.

Автор признателен Г. Б. Христиансену за обсуждение экспериментальных данных, С. И. Никольскому и А. И. Никишову за замечания.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Березинский В. С., Буланов С. В., Гинзбург В. Д., Догель В. А., Птускин В. С. Астрофизика космических лучей. М.: Наука, 1990.
- [2] Дьяконов М. Н., Егоров Т. А., Ефимов Н. Н. и др. Космическое излучение предельно высокой энергии. Наука, Новосибирск, Сиб. отд. АН, 1991.

- [3] T e s h i m a M. Proc. 23rd ICRC, Calgary. Invited, Rapporteur and Highlight Papers, 257 (1993). Eds. D. A. Leaky, R. B. Hicks, and D. Venkatesan, Singapore, World Scientific.
- [4] Зацепин Г. Т., Кузьмин В. А. Письма в ЖЭТФ, **4**, 114 (1966).
- [5] Greisen K. Phys. Rev. Lett., **16**, 748 (1966).
- [6] Stecker F. W. Phys. Rev. Lett., **21**, 1016 (1968).
- [7] Урысон А. В. Письма в ЖЭТФ, **64**, 71 (1996).
- [8] Afanasiev B. N., Dyakonov M. N., Egorov T. A., et al. Proc. 24th ICRC, Rome, **2**, 756 (1991).
- [9] Nagano M. et al. J. Phys. G: Nucl. Phys., **18**, 423 (1992).
- [10] Bird O. J., Corbato S. C., Dai H. Y., et al. Astrophys. J., **424**, 491 (1994).
- [11] Lawrence M. A., Reid R. J. O., Watson A. A. J. Phys. G: Nucl. Phys., **17**, 733 (1991).
- [12] Winn M. M., Ulrichs J., Deak L. S., et al. J. Phys. G: Nucl. Phys., **12**, 653 (1986).
- [13] Linsley J., Cunnigham G., Edge D. M., et al. Catalogue of Highest Energy Cosmic Rays, no. 1. World Data Center C2, Japan, 1980.
- [14] Berezhenko E. G. Proc. 24th ICRC, Rome, **3**, 372 (1995).
- [15] Hillas A. M. Can. J. Phys., **21**, 1016 (1968).
- [16] Hill C. T., Schramm D. N. Phys. Rev., **D31**, 564 (1985).
- [17] Березинский В. С., Григорьева С. И. ЖЭТФ, **93**, 812 (1988).
- [18] Дьяконов М. Н., Егоров Т. А., Иванов А. А. и др. Письма в ЖЭТФ, **50**, 408 (1989).
- [19] Cronin J. W. Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.), **28B**, 213 (1992).
- [20] Teshima M. et al. Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.), **28B**, 169 (1992).
- [21] Ameev S. S., Chasnikov I. Y., Fomin Yu. A., et al. Proc. 24th ICRC, Rome, **1**, 466 (1995).
- [22] Липовецкий В. А. Сообщ. САО, вып. 53, с. 47, САО АН СССР, 1987.
- [23] Артюх В. С., Оганнисян М. А. Письма в АЖ, **14**, 888 (1988).

Поступила в редакцию 9 декабря 1996 г.