

П И С Ь М А  
В ЖУРНАЛ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ  
И ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИОСНОВАН В 1965 ГОДУ  
ВЫХОДИТ 24 РАЗА В ГОДТОМ 65, ВЫПУСК 10  
25 МАЯ, 1997

Письма в ЖЭТФ, том 65, вып.10, стр.729 - 733

© 1997г. 25 мая

ВОЗМОЖНОЕ ПРОИСХОЖДЕНИЕ И СПЕКТР КОСМИЧЕСКИХ  
ЛУЧЕЙ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

А.В.Урысон

Физический институт им.П.Н.Лебедева РАН  
117924 Москва, Россия

Поступила в редакцию 18 февраля 1997 г.

После переработки 21 апреля 1997 г.

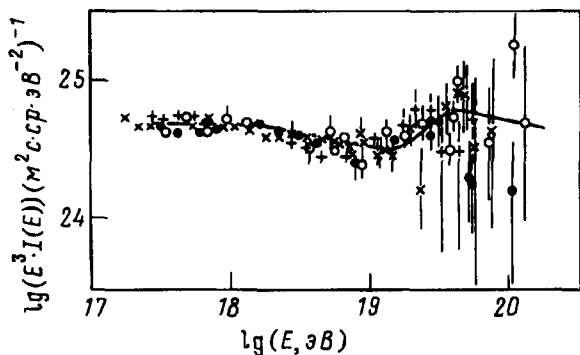
Проанализирована сложная форма спектра космических лучей, регистрируемых гигантскими установками в области энергий  $10^{17} - 10^{20}$  эВ. Показано, что в области  $10^{18} - 10^{19}$  эВ спектр, по-видимому, совпадает со спектром инжекции, показатель которого равен  $\approx 3.2 - 3.3$ . Пологая компонента в области  $(3.2 - 5) \cdot 10^{19}$  эВ обусловлена торможением внегалактических протонов на реликтовых фотонах. При энергиях, превышающих  $3.2 \cdot 10^{19}$  эВ, спектр, по-видимому, не имеет чернотельного обрезания.

PACS: 96.40.-z

Происхождение космических лучей сверхвысоких энергий  $E > 10^{17}$  эВ до конца не выяснено. Экспериментальные данные свидетельствуют, что космические лучи с энергией  $E > 4 \cdot 10^{19}$  эВ являются, по-видимому, внегалактическими [1-3]. Если это так, то их спектр может иметь чернотельное обрезание [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 обрезание будет отсутствовать, так как 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 75 км/с·Мпк. В таком случае спектр протонов не имеет чернотельного обрезания. В настоящее время экспериментальные данные, полученные на разных установках [8-13], не подтверждают и не опровергают его наличие.

Происхождение космических лучей в области  $10^{17} < E \leq 10^{19}$  эВ определяют на основе не только спектра, но и анизотропии и химического состава [1–3]. Однако существующие экспериментальные данные не достаточно определены для того, чтобы выяснить, галактическими или внегалактическими являются космические лучи таких энергий.

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



Спектры космических лучей при  $E > 10^{17}$  эВ, нормированные по энергии так же, как в [3], по измерениям на установках: ● – Якутской [8], × – Акено и AGASA [9], + – Мушинский глаз [10], ○ – Хавера Парк [11]. Сплошная линия – теоретический спектр

Спектры космических лучей, измеренные на установках [8–12] и нормированные по энергии так же, как это было сделано в [3], приведены на рисунке. Спектр имеет следующую форму [3, 8, 10]: при энергии  $E \sim 5 \cdot 10^{17}$  эВ наклон спектра  $\gamma$  возрастает от  $\gamma \approx 3.0 - 3.1$  до  $\gamma \approx 3.2 - 3.3$  (ошибка в определении  $\gamma$  составляет 0.02 – 0.06), а в области  $E \sim 10^{19}$  эВ уменьшается до значения  $\gamma \approx 2.6 - 2.7$  – в спектре появляется пологая компонента. Ошибка в определении наклона пологой компоненты составляет 0.1. (Наклоны спектра в [11–13] не приводятся.)

Распространение протонов в Галактике можно описать в рамках диффузионного приближения, если их энергия не превышает  $10^{17} - 10^{18}$  эВ [14]. Кроме того, в работах [15–17] было показано, что частицы перестают распространяться диффузионно, если их энергия превышает некоторое значение  $E_0$ , причем в области энергий  $E > E_0$  спектр протонов совпадает со спектром инъекции. (Отметим, что в [15–17] этот результат получен разными методами: в [15, 16] он обусловлен дрейфом космических лучей сверхвысоких энергий в крупномасштабных магнитных полях, в [17] – переходом к бесстолкновительному распространению частиц в среде, где они возбуждают МГД-волны.) Оценка энергии  $E_0$  была получена из численного моделирования траекторий частиц в галактическом магнитном поле [1]:  $E_0 \approx 2 \cdot 10^{18}$  эВ. Для степенного спектра инъекции [1] отсюда следует, что в области  $E \geq 2 \cdot 10^{18}$  эВ наклон  $\gamma_0$  равен  $\gamma$ ,  $\gamma_0 = \gamma$ .

Область  $E \geq 2 \cdot 10^{18}$  эВ – это та область, в которой наклон измеренного спектра возрастает. По измерениям [18] в составе космических лучей таких энергий преобладают протоны. Это означает, что, по-видимому, при энергии  $E > 10^{18}$  эВ их спектр инъекции меняется: его показатель увеличивается до значения  $\gamma_0 \approx 3.2 - 3.3$ , в то время как при  $E < 3 \cdot 10^{15}$  эВ он не превосходил 2.75,  $\gamma_0 < 2.75$  [1]. (Наклон спектра инъекции при  $3 \cdot 10^{15} - 4 \cdot 10^{17}$  эВ пока не

выяснен, поэтому сравнения с этим участком мы не проводим. Разные точки зрения см. в [3, 14].)

По-видимому, частицы с энергией  $E > E_{bb}$  ускоряются в основном в источниках, удаленных от нас не дальше, чем на 40–50 Мпк [7, 19, 20], и вследствие этого их спектр не имеет чернотельного обрезания. Если это так, то показатель спектра в этой области совпадает с показателем спектра инжекции  $\gamma_0$ . Примем, что в области  $E > E_{bb}$  спектр инжекции такой же, как при  $E \geq 2 \cdot 10^{18}$  эВ. Тогда в области  $E > E_{bb}$  наклон спектра будет равен  $\gamma = 3.2 - 3.3$ .

Частицы с энергией  $E > E_{bb}$ , распространяющиеся от источников, удаленных от нас на расстояния, больше 40 Мпк, будут взаимодействовать с реликтовым излучением до тех пор, пока их энергия не уменьшится до величины  $E \approx \approx (3.2 - 5) \cdot 10^{19}$  эВ. Частицы таких энергий могут не испытать ни одного взаимодействия в межгалактическом пространстве, так как 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  $E \approx (3.2 - 5) \cdot 10^{19}$  эВ, в результате наклон спектра в ней изменится от  $\gamma > 3.1$  до  $\gamma_1$ :

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

где  $E_3$  – верхняя граница диапазона энергий пологой компоненты. Величину  $\gamma_1$  найдем из данных [3, 8–13]. Измеренное значение  $E_3$  составляет  $E_3 \sim \sim 4 \cdot 10^{19}$  эВ, а энергия частиц определяется с ошибкой  $\sim 20 - 30\%$  [8, 10]. Поэтому мы оценили показатель  $\gamma_1$  для нескольких значений  $E_3$  в интервале  $4 \cdot 10^{19} < E_3 < 5 \cdot 10^{19}$  эВ и нескольких значений  $\gamma$  в интервале  $3.0 < \gamma \leq 3.3$ . Вычисленные значения  $\gamma_1$  приведены в таблице. Энергетический диапазон пологой компоненты с учетом ошибки в определении энергии 30% составляет  $E \approx (2 - 5) \cdot 10^{19}$  эВ. Он согласуется с результатами измерений [8, 9, 11–13] и не противоречит данным моноизмерений [10]. Возможное существование в спектре пологой компоненты такой природы предсказывалось в работах [21–23].

Вычисленный показатель  $\gamma_1$  пологой компоненты при различных значениях (в пределах экспериментальных ошибок) ее верхней границы  $E_3$  и наклона спектра  $\gamma$

$\gamma$	$E_3$ , эВ	$\gamma_1$
3.0	$4.9 \cdot 10^{19}$	2.6
3.05	$4.8 \cdot 10^{19}$	2.65
3.05	$4.9 \cdot 10^{19}$	2.7
3.1	$4.5 \cdot 10^{19}$	2.6
3.2	$4.5 \cdot 10^{19}$	2.7
3.25	$4.3 \cdot 10^{19}$	2.7
3.3	$4.2 \cdot 10^{19}$	2.7

Причем, что протоны с энергией  $E < E_{bb}$  являются галактическими, протоны с  $E > E_{bb}$  – внегалактическими, а их спектры инжекции одинаковы. Теоретический спектр, полученный на основе этой модели для  $\gamma_0 = 3.25$ , показан на рисунке. Он нормирован по измеренной интенсивности при  $E \approx 7 \cdot 10^{19}$  эВ. Кроме того, в расчетах было принято, что область энергии пологой компоненты составляет  $E \approx (3.2 - 5) \cdot 10^{19}$  эВ. Теоретический спектр согласуется с данными измерений в пределах ошибок.

Сравним наклоны теоретического и измеренного спектров в области  $E \geq 10^{19}$  эВ. Из таблицы видно, что на основе предложенной модели можно получить показатель  $\gamma_1$ , который согласуется с наклоном пологой компоненты.

Для оценки наклона измеренного спектра в области  $E > E_{bb}$  воспользуемся сводкой экспериментальных данных в работе [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  $E \geq 10^{20}$  эВ. Для степенного спектра с числом частиц  $N$ , у которых энергия не меньше  $E$ ,  $N(\geq E)$ , выполняется соотношение  $N_1(\geq E_1)/N_2(\geq E_2) = (E_1/E_2)^{\gamma+1}$ , и из него получаем  $\gamma = 3.1^{+0.2}_{-0.1}$  при  $E_1 = 10^{19}$  эВ,  $E_2 = 10^{20}$  эВ.

Некоторые из 881 события имеют энергию в интервале  $\approx (1-3.2) \cdot 10^{19}$  эВ и составляют пологую компоненту. Поэтому в области  $E > 3.2 \cdot 10^{19}$  эВ показатель спектра будет больше, чем полученная оценка:  $\gamma > 3.1$  и, следовательно,  $\gamma_0 > 3.1$ .

Если чернотельное обрезание отсутствует, спектр протонов совпадает со спектром инъекции в двух областях:  $2 \cdot 10^{18} \leq E < 10^{19}$  эВ и  $E \geq 5 \cdot 10^{19}$  эВ. Оценки наклона спектра в этих интервалах согласуются -  $\gamma = 3.2 - 3.3$  и  $\gamma > 3.1$ , следовательно, измеренный спектр, по-видимому, не имеет чернотельного обрезания. (В работе [3] на основе этих же экспериментальных данных был сделан вывод о его возможном существовании. В ней предполагалось, что если обрезания нет, то наклон спектра при  $E > E_{bb}$  совпадает с наклоном пологой компоненты.)

Из представленной картины следует, что в области выемки галактические космические лучи сменяются внегалактическими. Амплитуда анизотропии галактических космических лучей при  $E > 10^{18}$  эВ в несколько раз выше, чем у внегалактических, но из-за больших ошибок измерений надежно определить их происхождение таким образом пока не удастся [24]. Данные о химическом составе в этой области также пока не определены. По измерениям [10] состав космических лучей в области  $4 \cdot 10^{17} - 4 \cdot 10^{19}$  эВ меняется - в нем начинают преобладать протоны, однако по измерениям [18] увеличение доли протонов начинается уже при энергии  $\sim 10^{16}$  эВ.

Полученные выводы могут быть проверены в дальнейших измерениях спектра космических лучей в области  $E > 10^{17}$  эВ на установках [8-11], а также на установках [25, 26] и ШАЛ-1000 [27], которые будут иметь значительно лучшее энергетическое разрешение.

Я признательна С.И.Никольскому и Г.Б.Христиансену за обсуждение экспериментальных данных, В.А.Догелю и В.С.Птускину за обсуждение моделей распространения галактических космических лучей.

- 
1. В.С.Березинский, С.В.Буланов, В.Л.Гинзбург и др., *Астрофизика космических лучей*, М.: Наука, 1990.
  2. М.Н.Дьяконов, Т.А.Егоров, Н.Н.Ефимов и др., *Космическое излучение предельно высокой энергии*, Новосибирск: Наука, 1991.
  3. M.Teshima, *Proc. 23rd ICRC, Calgary. Invited, Rapporteur and Highlight Papers*, p.257, Eds. D.A.Leakhy, R.B.Hicks, D.Venkatesan, Singapore-N.Y.-London-Hong-Kong: World Scientific, 1993.
  4. Г.Т.Зацепин, В.А.Кузьмин, *Письма в ЖЭТФ* 4, 114 (1966).
  5. K.Greisen, *Phys. Rev. Lett.* 16, 748 (1966).
  6. F.W.Stecker, *Phys. Rev. Lett.* 21, 1016 (1968).

7. A.B.Урысон, Письма в ЖЭТФ **64**, 71 (1996).
8. B.N.Afanasiev, M.N.Dyakov, T.A.Egorov et al., *Proc. 24th ICRC*, Rome, **2**, 756 (1995).
9. M.Nagano et al. *J. Phys. G: Nucl. Phys.* **18**, 423 (1992).
10. O.J.Bird, S.C.Corbato, H.Y.Dai et al., *Ap. J.* **424**, 491 (1994).
11. M.A.Lawrence, R.J.O.Reid, and A.A.Watson, *J. Phys. G: Nucl. Phys.* **17**, 733 (1991).
12. M.M.Winn, J.Ulrichs, L.S.Deak et al., *J. Phys. G: Nucl. Phys.* **12**, 653 (1986).
13. J.Linsley, G.Cunningham, D.M.Edge et al., *Catalogue of Highest Energy Cosmic Rays*, N1, World Data Center C2, Japan, 1980.
14. V.S.Ptuskin, S.I.Rogovaya, V.N.Zirakashvili et al., *A&Ap.* **268**, 726 (1993).
15. S.I.Syrovatskii, *Comm. Astrophes. Space Phys.* **3**, 155 (1971).
16. V.S.Berezinsky, A.A.Mikhailov, and S.I.Syrovatskii, *Proc. 16th ICRC*, Kyoto, **2**, 86 (1979).
17. V.A.Dogiel, A.V.Gurevich, and K.P.Zybin, *A&Ap.* **281**, 937 (1994).
18. М.Н.Дьяконов, В.П.Егорова, А.А.Иванов и др., Письма в ЖЭТФ **50**, 408 (1989).
19. J.Rachen, T.Stanev, and P.Biermann, *A&Ap.* **273**, 377 (1995).
20. R.J.Protheroe and P.A.Johnson, *Proc. 24th ICRC*, Rome, **3**, 309 (1995).
21. A.M.Hillas, *Can. J. Phys.* **21**, 1016 (1968).
22. C.T.Hill and D.N.Schramm, *Phys. Rev. D* **31**, 564 (1985).
23. В.С.Березинский, С.И.Григорьева, ЖЭТФ **93**, 812 (1988).
24. D.N.Pochepkin, V.S.Ptuskin, S.I.Rogovaya et al., *Proc. 24th ICRC*, Rome, **3**, 136 (1995).
25. M.Teshima et al., *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **28B**, 169 (1992).
26. J.W.Cronin, *Nucl. Phys. A* **25A**, 137 (1992).
27. S.S.Ameev, I.Y.Chasnikov, Yu.A. Fomin et al., *Proc. 24th ICRC*, Rome, **1**, 466 (1995).