

## ВОЗМОЖНЫЕ ИСТОЧНИКИ КОСМИЧЕСКИХ ПРОТОНОВ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

А.В.Урысон

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

Поступила в редакцию 17 июня 1996 г.

Проанализированы направления прихода ливней с энергией выше  $3.2 \cdot 10^{19}$  эВ, зарегистрированные установками Акено и AGASA. Проведено сравнение их распределения по небесной сфере с распределениями возможных источников протонов столь больших энергий. С учетом трехкратной ошибки в определении направлений прихода ливней получено, что источниками протонов, инициировавших ливни, являются ядра активных галактик с красным смещением  $Z \leq 0.0092$ , то есть удаленные от нас на расстояния не более 40 Мпк, если постоянная Хаббла  $H = 75$  км/с·Мпк.

PACS: 98.70.Sa

Происхождение космических протонов сверхвысоких энергий  $E > 10^{17}$  эВ пока остается неясным. С точки зрения энергетики, механизмов ускорения, а также удержания частиц галактическими магнитными полями наиболее вероятными их источниками в Галактике могут быть пульсары, а за ее пределами – ядра активных галактик или квазаров [1–3], и/или горячие пятна радиогалактик [4]. (При взрыве сверхновых максимальная энергия ускоряемых протонов составляет  $10^{15}$  эВ [5].)

Экспериментальные данные свидетельствуют, что широкие атмосферные ливни с энергией  $E > 4.5 \cdot 10^{19}$  эВ преимущественно идут со стороны высоких галактических широт [6, 7]. Это указывает на их возможное внегалактическое происхождение. Спектр внегалактических протонов может иметь характерную особенность – резкое укрупнение при энергии  $E \approx 3 \cdot 10^{19}$  эВ, обусловленное взаимодействием протонов с реликтовым излучением, так что поток частиц с энергией  $E \approx 6 \cdot 10^{19}$  эВ убывает вдвое по сравнению со степенной экстраполяцией [8, 9]. Однако, если источниками таких протонов являются в основном объекты, расположенные сравнительно близко от нас, чернотельное обрезание будет отсутствовать: эффективный средний свободный пробег частиц с энергией  $5 \cdot 10^{19}$ ,  $10^{20}$  эВ в поле реликтовых фотонов составляет 1000 и 200 Мпк, соответственно, а расстояния порядка 10–15 Мпк преодолевают практически свободно протоны любых энергий, вплоть до  $E \approx 10^{22}$  эВ [10]. Поэтому, если источники протонов удалены от нас на расстояния порядка десятков Мпк, спектр не будет иметь чернотельного обрезания.

Оценки расстояний до возможных источников космических лучей с  $E > 4 \cdot 10^{19}$  эВ можно найти в работах [4, 11]. В [4] из анализа химического состава и спектра космических лучей, полученных разными группами, получена оценка расстояний порядка 50 Мпк в предположении, что источники – мощные радиогалактики. В [11] показано, что около 30% зарегистрированных протонов пришли из плоскости Местного Сверхскопления, то есть с расстояний порядка 15–30 Мпк.

В настоящей работе мы сравнили распределение направлений прихода ливней с  $E > 3.2 \cdot 10^{19}$  эВ из [11, 12] с распределениями по небесной сфере ядер активных (и радио-) галактик и рентгеновских пульсаров (как наиболее мощных). Предполагалось, что в межгалактическом пространстве протоны распространяются прямолинейно, а их отклонением в магнитных полях Галактики можно пренебречь. (Галактическое магнитное поле составляет около  $(3 - 5) \cdot 10^{-6}$  Э на длине порядка 20 кпк [1].)

Распределение по небу направлений прихода ливней было получено из данных установок Акено и AGASA (данные о направлениях прихода ливней, зарегистрированных на других установках, не публиковались): это направления прихода 12 ливней с  $E > 3.2 \cdot 10^{19}$  эВ в экваториальных координатах  $(\alpha, \delta)$  из [12] и галактические координаты  $(l, b)$  3-х пар ливней с  $E \geq 4 \cdot 10^{19}$  эВ, имеющих в пределах ошибок одинаковые координаты, из [11]. Поскольку в одну из этих пар входит ливень из [12], всего имелось 17 ливней. Среднеквадратичная ошибка в определении координат ливней [11] составляет  $\sigma_{sh} = \sqrt{2} \cdot 1.6^\circ \approx 2.3^\circ$  и  $\sigma_{sh} \approx 3^\circ$  для ливней [12]. Точность в определении оптических координат галактик и пульсаров составляет секунды, поэтому при отождествлении возможных источников протонов область поиска определялась кругом радиусом  $3\sigma_{sh} = 7, 8, 9^\circ$ . Согласно статистике при случайном распределении ошибок координат, протон находится внутри поля  $3\sigma_{sh}$  с вероятностью 99.8%. Поиск радиогалактик и галактик с активными ядрами проводился по каталогам [13, 14] – рассматривались все галактики из [13] и те галактики из [14], которые не вошли в [13]. Поиск рентгеновских пульсаров проводился по каталогу [15].

Рассмотрим сначала поиск галактик.

Ливни были разбиты на группы: ливни, пришедшие из участков неба с галактической широтой  $|b| \geq 30^\circ$  –

- a) 6 ливней из [12],
- b) 10 ливней из [11] и из [12];

а также

- c) 12 ливней без отбора по  $|b|$  из [12],
- d) все 17 ливней без отбора по  $|b|$  из [11, 12].

В поле ошибок ливня попало, как правило, более одной галактики, но в каждом поле была хотя бы одна галактика с красным смещением  $z \leq 0.0092$ . Направления прихода ливней в координатах  $(\alpha, \delta)$ , принадлежность к группе, а также координаты и красные смещения галактик с  $z \leq 0.0092$ , попавших в поле ошибок ливней, приведены в табл.1. (Ливни пронумерованы нами.) Общее число ливней  $K$  в группе и число ливней  $N$  в группе, у которых в поле поиска попала хотя бы одна галактика, приведены в табл.2.

Далее мы определили вероятности случайного попадания галактик с разными  $z$  в поле ошибок  $N$  из  $K$  ливней. Рассматривались группы искусственных ливней, у которых координаты прихода определялись случайным образом. Группы состояли из 6 и 10 ливней, пришедших из участков неба с  $|b| \geq 30^\circ$ , и 12 и 17 ливней без ограничений на величину  $b$ . В каждой группе координаты искусственных ливней определялись с помощью генератора случайных чисел [16] в полосе обзора  $\alpha = (0 - 24) \text{ ч}$ ,  $\delta = (-10 - 80^\circ)$ . В искусственных группах подсчитывалось число ливней  $N_{sim}$ , у которых в поле ошибок  $3\sigma_{sh}$

попала хотя бы одна галактика с  $z \leq z_1 = 0.022, 0.0167, 0.0092$  и с любой величиной  $z$ . Величина  $N_{sim}$  принимала значения  $0 \leq N_{sim} \leq K$ . В группе из  $K$  ливней вероятность  $P$  случайного попадания галактики в поле ошибок данного числа ливней  $N_{sim}$  определялась так:  $P = \sum_{i=1}^M (N_{sim})_i / M$ , где  $M$  – количество испытаний, проведенных для каждой группы.

Таблица 1

Направления прихода ливней, принадлежность к группе и координаты и красные смещения галактик, попавших в поле ошибок ливня

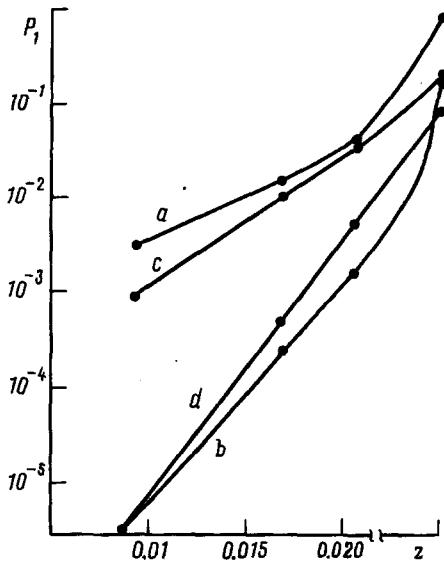
№	Ливень		Ссылка	Группа	Галактики с $z \leq 0.0092$ в поле ливня $3\sigma_{sh} = 9^\circ$	
	$\alpha$	$\delta$			координаты [13]	$z$ [13]
1	$1^h 42^m$	$71.0^\circ$	[12]	$c, d$	–	–
2	3 30	70	[12]	$c, d$	–	–
3	5 20	20	[12]	$c, d$	–	–
4	11 10	24	[12]	$a, b, c, d$	$11^h 37^m + 32.1^\circ$	0.0092
5	11 12	57.8	[11]	$b, d$	1119 + 593	0.0058
6	11 27	57.3	[11]	$b, d$	1129 + 533	0.0036
7	12 23	21.2	[11]	$b, d$	1223 + 129	0.0082
8	12 28	20	[11]	$b, d$	1225 + 173 1225 + 288 1233 + 262	0.0066 0.0023 0.0037
9	13 25	16	[12]	$a, b, c, d$	1304 + 133	0.0091
10	13 40	35	[12]	$a, b, c, d$	1335 + 359	0.0034
11	14 00	50	[12]	$a, b, c, d$	1403 + 539	0.0014
12	15 30	41	[12]	$a, b, c, d$	1524 + 418	0.0083
13	18 42	48	[11]	$d$	1907 + 508	0.0080
14	18 44	47.4	[11, 12]	$c, d$	1907 + 508	0.0080
15	20	60	[12]	$c, d$	–	–
16	21 50	28	[12]	$c, d$	2205 + 311	0.0041
17	23 20	3	[12]	$a, b, c, d$	2341 + 096	0.0067

Таблица 2

Общее число  $K$  ливней в группах, число ливней  $N$ , у которых в поле ошибок попала хотя бы одна галактика с  $z \leq 0.0092$ , и вероятность  $P$  случайного попадания в поле ошибок  $3\sigma_{sh}$  у  $N$  ливней

Группа ливней	Число ливней $K$	Число ливней $N$	Вероятность $P$ , $3\sigma_{sh}$		
			$7^\circ$	$8^\circ$	$9^\circ$
$a$	6	6	$3.2 \cdot 10^{-3}$	$1.1 \cdot 10^{-2}$	$2.05 \cdot 10^{-2}$
$b$	10	10	$< 10^{-5}$	$4.0 \cdot 10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$
$c$	12	8	$8 \cdot 10^{-4}$	$4.1 \cdot 10^{-3}$	$6.8 \cdot 10^{-3}$
$d$	17	13	$< 10^{-5}$	$< 10^{-5}$	$2.0 \cdot 10^{-4}$

Полученные таким образом вероятности  $P$  случайного попадания галактики в поле ошибок ливня для  $M = 10000$  и разных значений  $z$  в группах ( $a, b, c, d$ ) показаны на рисунке. Вероятности для  $z \leq 0.0092$ ,  $3\sigma_{sh} = 7, 8, 9^\circ$  приведены, кроме того, в табл. 2. Из приведенных значений  $P$  видно, что случайное попадание галактики с  $z \leq 0.0092$  в поле поиска заданного числа ливней  $N$



Вычисленные значения случайного попадания хотя бы одной галактики с любым  $z$  и с  $z \leq z_1 = 0.022, 0.0167, 0.0092$  в поле ошибок  $3\sigma_{sh} = 7^\circ$  из  $K$  ливней. Кривые через расчетные точки проведены для наглядности:  $a - K = N = 6$ ;  $b - K = N = 10$ ;  $c - K = 12, N = 8$ ;  $d - K = 17, N = 13$

является маловероятным событием для групп с  $N \geq 6$ , если  $3\sigma_{sh} = 7^\circ$ , и для группы с  $N > 6$ , если  $3\sigma_{sh} = 8, 9^\circ$ .

Поиск рентгеновских пульсаров дал следующие результаты.

Пульсар A0535+26 (X0535+262) попал в поле ошибок ливня 3. Вероятность случайного попадания одного пульсара в поле поиска какого-либо из 12 ливней составляет 0.066, поэтому по теории вероятностей такое совпадение может быть случайным.

Ни одна из галактик, перечисленных в табл.1, не излучает значительных потоков в радио- или рентгеновском диапазонах [13,14]. Это означает, что наличие мощного излучения в указанных диапазонах, по-видимому, не является необходимым условием для источников рассматриваемых протонов. Возможными источниками являются галактики с активными ядрами, удаленные от нас на расстояния  $R \leq 40$  Мпк при постоянной Хаббла  $H = 75$  км/с.Мпк. Если это так, то спектр внегалактических протонов не будет иметь чернотельного обзрения.

Полученные выводы могут быть проверены в начинающихся исследованиях [17]. В них будет получена большая статистика ливней сверхвысоких энергий при точности определения координат около  $0.2^\circ$ .

Я глубоко признательна Г.Б.Христиансену за интерес и внимание к работе и А.В.Засову и А.И.Никишову за обсуждения. Я благодарна А.Г.Горшкову, В.К.Конниковой и О.К.Сильченко за обсуждения каталогов галактик и критериев отбора источников.

1. В.С.Березинский, С.В.Буланов, В.Л.Гинзбург и др., *Астрофизика космических лучей*, М.: Наука, 1990.
2. R.J.Protheroe and A.P.Szabo, *Phys. Rev. Lett.* **69**, 2885 (1992).
3. M.H.Salamon and F.W.Stecker, *Phys. Rev. Lett.* **73**, 35 (1994).

4. J.Rachen, T.Stanev, and P.Biermann, *A&Ap.* **273**, 377 (1993).
5. E.G.Berezhko, *Proc. 24th ICRC, Rome* **3** (1995), p.372.
6. М.Н.Дьяконов, Т.А.Егоров, Н.Н.Ефимов и др., *Космическое излучение предельно высокой энергии*, Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1991.
7. B.N.Afanasiev, M.N.Dyakonov, T.A.Egorov et al., *Proc. 24th ICRC, Rome*, **2** (1995), p.796.
8. Г.Т.Зацепин, В.А.Кузьмин, *Письма в ЖЭТФ* **4**, 114 (1966).
9. K.Greisen, *Phys. Rev. Lett.* **16**, 748 (1966).
10. F.W.Stecker, *Phys. Rev. Lett.* **21**, 1016 (1968).
11. N.Hayashida, K.Honda, M.Honda et al., *ICRR Report 361-96-12*, Tokyo, 1996.
12. N.Hayashida, K.Honda, M.Honda et al., *Proc. 22nd ICRC, Dublin*, **2** (1991), p.117.
13. В.А.Липовецкий, С.Н.Неизвестный, О.М.Неизвестная, *Сообщения CAO, вып. 55, CAO АН СССР*, 1987.
14. M.P.Veron-Cetty and P.Veron, *ESO Scientific report*, N10, 1991.
15. С.Б.Попов, <http://xray.sai.msu.ru/~polar/> (1996).
16. G.E.Forsythe, M.A.Malcolm, and C.B.Moler, *Computer methods for mathematical computations* -N.J.: Prentice Hall, Inc., 1977.
17. M.Teshima et al., *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **28B**, 169 (1992).