

ЖУРНАЛ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
И ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

ОСНОВАН В МАРТЕ 1873 ГОДА
ВЫХОДИТ 12 РАЗ В ГОД
МОСКВА

ТОМ 116, ВЫПУСК 4(10)
ОКТАБРЬ, 1999
«НАУКА»

ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ КОСМИЧЕСКИХ
ЛУЧЕЙ ПО ДАННЫМ РАЗНЫХ УСТАНОВОК

© 1999

А. В. Урысон*

Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук
117924, Москва, Россия

Поступила в редакцию 6 апреля 1999 г.

Рассматриваются ливни с энергией $E > 3.2 \cdot 10^{19}$ и $E \geq 10^{20}$ эВ, зарегистрированные на установках Акено и AGASA, Хавера Парк и в Якутске. Проанализировано, как зависит отождествление источников от величины ошибки, с которой определяют направления прихода ливней. Подтвержден вывод наших предыдущих работ — основными источниками частиц, инициировавших ливни, являются сейфертовские галактики с красными смещениями $z \leq 0.0092$, слабо излучающие в рентгеновском и радиодиапазонах.

PACS: 98.70.Sa, 96.40.pq, 14.20.Dh

1. ВВЕДЕНИЕ

Происхождение космических лучей с энергией $E > 4 \cdot 10^{19}$ эВ является предметом интенсивных исследований. Из анализа широких атмосферных ливней, инициируемых космическими лучами, следует, что частицы таких энергий имеют, по-видимому, внегалактическое происхождение [1–4] и приходят к нам с расстояний, не превышающих ~ 50 Мпк [4, 5]. (Частицы — фрагменты ядер с $E \approx (2-3) \cdot 10^{20}$ эВ — могут приходить с расстояний ~ 100 Мпк [6].) Если это так, то спектр космических лучей в области $E \geq 10^{20}$ эВ не имеет чернотельного обрезания, предсказанного в работах [7, 8]. Действительно, частицы с энергией $E \geq 10^{20}$ эВ были зарегистрированы на разных

*E-mail: uryson@sci.lebedev.ru

© Российская академия наук, Отделение общей физики и астрономии,
Институт физических проблем им. П. Л. Капицы, 1999 г.

наземных установках — Сиднейской [9], Якутской [10], Хавера Парк [11], Мушинный глаз [12], Акено и AGASA [13]. Обсуждение спектров, полученных на этих установках, приведено в работах [12–15]. В наших предыдущих статьях [16, 17] мы анализировали данные измерений и привели аргументы в пользу того, что спектр не имеет чернотельного обрезания.

Задавшись координатами направлений прихода частиц и диапазоном расстояний до ~ 100 Мпк, можно попытаться отождествить источники космических лучей.

Источники, которые рассматриваются в литературе, подразделяются на три группы. Во-первых, это различные астрофизические объекты — пульсары, ядра активных галактик [1], горячие пятна мощных радиогалактик и квазаров [5], лацертиды [18], взаимодействующие галактики [19]; во-вторых, частицы сверхвысоких энергий могут генерироваться космическими струнами [20]; в-третьих, они могут рождаться при распадах метастабильных сверхтяжелых частиц холодной темной материи, которые накапливаются в гало галактик [21]. (Обсуждается также возможность ускорения частиц в гамма-всплесках [22].) Непосредственно отождествить источники можно только в том случае, если они принадлежат первой группе. Во втором случае любые объекты, попадающие в область вокруг направлений прихода частиц, будут случайными. В третьем случае основной поток частиц будет из гало Галактики и возможен слабый поток из скопления галактик в Деве [21].

Мы отождествляли источники космических лучей в наших предыдущих работах [23–25] из анализа 17 ливней Акено и AGASA с энергией $3.2 \cdot 10^{19} < E \leq 2 \cdot 10^{20}$ эВ, у которых координаты направлений прихода определены со среднеквадратичной ошибкой $\sigma_{sh} \leq 3^\circ$ [4, 26]¹⁾. Была принята первая модель (источники — астрофизические объекты), и в качестве возможных источников рассматривались рентгеновские пульсары (как наиболее мощные), сейфертовские галактики, лацертиды и радиогалактики. Область поиска источников определялась только ошибкой в направлении прихода ливней в экваториальных координатах ($\Delta\alpha$, $\Delta\sigma$) и составила $3\sigma_{sh} = 3(\Delta\alpha, \Delta\delta)$. Такая величина поля поиска обусловлена двумя причинами. Во-первых, из статистики [27] известно, что протон находится внутри поля среднеквадратичной ошибки с вероятностью только 66%, внутри поля тройной ошибки он находится с вероятностью 99.8%. Во-вторых, ошибкой в определении оптических координат астрофизических объектов можно пренебречь, так как она составляет секунды, а ошибка в координатах ливней — градусы. (Предполагалось, что межгалактические магнитные поля достаточно слабые, $B \leq 8.7 \cdot 10^{-10}$ Гс [25], и протон, отклоняясь ими, остается в области $3(\Delta\alpha, \Delta\delta) \leq 9^\circ$.) Вычислив вероятности случайного попадания возможных источников в поле $3\sigma_{sh}$ вокруг оси ливня, мы получили, что эта вероятность достаточно мала, $P > 3\sigma$, только для сейфертовских галактик с красными смещениями $z \leq 0.0092$, т. е. удаленных от нас на расстояния не более 40 Мпк, если постоянная Хаббла $H = 75$ км/с·Мпк. Радио- и рентгеновское излучения у этих галактик слабое. (Здесь σ — параметр распределения Гаусса в теории ошибок.)

В данной работе кроме этих 17 ливней рассматриваются ливни с $E > 4 \cdot 10^{19}$ эВ, зарегистрированные на Якутской установке (их ошибки вычислены в настоящей работе), и ливни с $E \geq 10^{20}$ эВ — два ливня, зарегистрированные на установке Хавера Парк [11] и один — на установке Мушинный глаз [12].

¹⁾ В нашей работе [23] неверно указаны координаты ливней 7, 8. Ближайшая сейфертовская галактика в поле их поиска NGC660, $z = 0.003$ [31]. На выводы [23] это не повлияло.

2. ЛИВНИ С ЭНЕРГИЕЙ $3.2 \cdot 10^{19} < E < 10^{20}$ эВ

2.1. Якутские ливни

На Якутской установке было зарегистрировано 12 ливней с энергией $E > 4 \times 10^{19}$ эВ [10]. Ошибки в направлениях их прихода $\Delta\alpha$, $\Delta\delta$ были вычислены следующим образом. В измерениях [10, 28] были определены горизонтальные координаты оси ливня θ , φ и ошибки $\Delta\theta$ и телесного угла $\Delta\Omega$. Ошибка φ равна $\Delta\varphi = d\Omega/(\sin\theta \cdot \Delta\theta)$. Из соотношений, связывающих горизонтальные и экваториальные координаты (см., например, [2]),

$$\sin\delta = \sin\varphi_0 \cos\theta - \cos\varphi_0 \sin\theta \cos\varphi, \quad \alpha = t_l - t, \quad \sin t = \sin\theta \sin\varphi / \cos\delta,$$

$$\cos t = (\cos\varphi_0 \cos\theta + \sin\varphi_0 \sin\theta \cos\varphi) / \cos\delta$$

(здесь $\varphi_0 = 61.7^\circ N$ — географическая широта Якутской установки, t_l — местное звездное время, t — всемирное время, долгота Якутской установки $129.4^\circ E$), были вычислены значения α , δ при (θ, φ) , $(\theta + \Delta\theta, \varphi)$, $(\theta - \Delta\theta, \varphi)$, $(\theta, \varphi + \Delta\varphi)$, $(\theta, \varphi - \Delta\varphi)$. Затем были найдены разности

$$\Delta\delta(\theta_+) = \delta(\theta, \varphi) - \delta(\theta + \Delta\theta, \varphi), \quad \Delta\delta(\theta_-) = \delta(\theta, \varphi) - \delta(\theta - \Delta\theta, \varphi),$$

$$\Delta\delta(\varphi_+) = \delta(\theta, \varphi) - \delta(\theta, \varphi + \Delta\varphi), \quad \Delta\delta(\varphi_-) = \delta(\theta, \varphi) - \delta(\theta, \varphi - \Delta\varphi)$$

и такие же разности $\Delta\alpha$. Разности $\Delta\alpha$, $\Delta\delta$ и есть ошибки величин α , δ , обусловленные ошибками измерений θ , φ . (Вычисление ошибок по разностям аналогично формальному подходу с вычислением соответствующих частных производных [27].)

Далее мы нашли разброс ошибок склонения и прямого восхождения, объединив ошибки следующим образом: из каждой пары вычисленных ошибок $\Delta\delta(\theta_+)$, $\Delta\delta(\theta_-)$, $\Delta\delta(\varphi_+)$, $\Delta\delta(\varphi_-)$ были взяты максимальные значения $\Delta\delta(\theta)_{max}$, $\Delta\delta(\varphi)_{max}$ и найдена максимальная ошибка склонения

$$\Delta\delta_{max} = [\Delta\delta^2(\theta)_{max} + \Delta\delta^2(\varphi)_{max}]^{1/2},$$

из минимальных значений $\Delta\delta(\theta)_{min}$, $\Delta\delta(\varphi)_{min}$ была найдена минимальная ошибка склонения

$$\Delta\delta_{min} = [\Delta\delta^2(\theta)_{min} + \Delta\delta^2(\varphi)_{min}]^{1/2}$$

и точно так же

$$\Delta\alpha_{max} = [\Delta\alpha^2(\theta)_{max} + \Delta\alpha^2(\varphi)_{max}]^{1/2}, \quad \Delta\alpha_{min} = [\Delta\alpha^2(\theta)_{min} + \Delta\alpha^2(\varphi)_{min}]^{1/2}.$$

Направления прихода ливней с вычисленными ошибками и сейфертовские галактики с $z \leq 0.0153$ в поле их поиска перечислены в табл. 1. (Галактики излучают слабые потоки в радио- и рентгеновском диапазонах.) Ошибки $\Delta\alpha$, $\Delta\delta$ в направлениях прихода якутских ливней, как правило, превышают 3° , и отличаются от ливня к ливню в несколько раз. Выясним, как отождествление источников зависит от величины ошибки.

2.2. Влияние ошибки в направлении прихода ливней на отождествление источников

Для анализа мы взяли ливни Акено и AGASA [4, 26] с $E < 10^{20}$ эВ, у которых ошибка в координатах прихода $\sigma_{sh} \leq 3^\circ$. Их координаты и сейфертовские галактики с $z \leq 0.0092$ в поле поиска ($3\Delta\alpha$, $3\Delta\delta$) перечислены в табл. 2. Три ливня из табл. 2 — № 2–4, у которых в поле поиска не нашлось ни одной такой галактики, пришли из участков неба с галактической широтой $|b| \leq 10^\circ$, т. е. заведомо попали в «зоны избегания» галактик. Поэтому мы рассмотрели две группы ливней: (1) — все ливни, (2) — ливни, пришедшие из участков неба с $|b| > 10^\circ$. Число ливней K в (1) и (2) и число ливней N , у которых в поле поиска попала хотя бы одна галактика с $z \leq 0.0092$, приведено в табл. 3. Мы рассмотрели группы из K искусственных ливней, у которых координаты прихода определялись случайным образом, а ошибка в направлении прихода составляла $(\Delta\alpha, \Delta\delta) = 3, 4, 5, 6, 7^\circ$, и определили вероятности случайного попадания галактик с $z \leq 0.0092$ в поле поиска $3(\Delta\alpha, \Delta\delta)$ заданного числа ливней N так же, как в нашей работе [23]. Значения вероятностей приведены в табл. 3. Из нее следует, что величина ошибки в направлении прихода ливней влияет на отождествление источников. Вероятность случайного попадания галактик в поле поиска заданного числа ливней оказалась разной для разных каталогов галактик. Для каталогов [29, 30], которыми мы пользовались, эта вероятность мала, $P > 3\sigma$, у ливней (1), если $(\Delta\alpha, \Delta\delta) < 4^\circ$, у ливней (2) при $(\Delta\alpha, \Delta\delta) < 6^\circ$. Поэтому для отождествления источников предлагаемым методом необходимо отбирать ливни, у которых ошибка в направлении прихода $(\Delta\alpha, \Delta\delta)$ не превосходит 4° , а если ливни имеют $|b| > 10^\circ$, то 6° .

2.3. Отождествление источников по ливням с энергией $3.2 \cdot 10^{19} < E < 10^{20}$ эВ

Исходя из результатов разд. 2.2, мы включили в статистику (1) якутские ливни № 1, 3, 5, 12, в статистику (2) — якутские ливни № 1, 5, 7, 12. Новое число ливней K в (1) и (2) и вероятности случайного попадания галактик с $z \leq 0.0092$ в поле поиска у N из них приведены в табл. 4. Эти вероятности малы, $P = 3\sigma - 3.70\sigma$, следовательно, данные якутской установки подтверждают отождествление источников, проведенное ранее по данным [26, 27].

3. ЛИВНИ С ЭНЕРГИЕЙ $3.2 \cdot 10^{19} < E \leq 3 \cdot 10^{20}$ эВ

Данные о ливнях с $E \geq 10^{20}$ эВ приведены в табл. 5. В ней же перечислены сейфертовские галактики с красными смещениями $z \leq 0.0174$, попавшие в поле поиска ($3\Delta\alpha$, $3\Delta\delta$) вокруг оси ливня. Ливни № 1, 4, 5 табл. 5 могут быть включены в статистику (1) и (2). Число ливней K в получившихся группах и вероятности P случайного попадания галактик с $z \leq 0.0092$ в поле поиска у N из них приведены в табл. 4. Величина вероятности зависит от каталога галактик, по которому проводилось отождествление, но в любом случае она мала: для ливней без отбора по галактической широте b имеем $P = (2.5-7.2) \cdot 10^{-4}$, для ливней с $|b| > 10^\circ$ имеем $P = 3.0 \cdot 10^{-5} - 5.9 \cdot 10^{-4}$. Вероятности случайного попадания в поле поиска N из K ливней сейфертовских галактик с разными z показаны на рисунке. Из него следует, что выбирая в поле поиска галактики с $z \leq 0.0174$, мы действительно выбираем те, у которых случайное совпадение координат с направлением частиц маловероятно.

Таблица 1

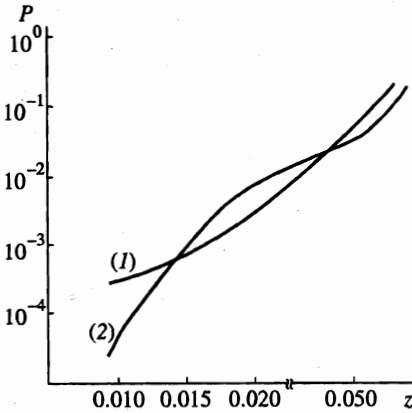
Направления прихода якутских ливней в экваториальных координатах [10], вычисленные ошибки в направлениях их прихода $\Delta\alpha$, $\Delta\delta$ и сейфертовские галактики с $z \leq 0.0153$ из [29, 30] в поле поиска ливней. У ливней № 3, 4, 6, 11 оси имеют $|b| \leq 10^\circ$, и они заведомо попадают в «зоны избегания» галактик

№ ливня	Координаты		Ошибки		Сейфертовские галактики			
	α°	δ°	$\Delta\alpha^\circ$	$\Delta\delta^\circ$	α	δ	z	Каталог
1	163.7	52.9	3.0–3.2	1.9	11 ^h 19 ^m 59.3°		0.0058	[29]
					1129 + 533		0.0036	[29, 30]
2	270.5	67.6	8.4–8.8	1.4–1.6	1822 + 665		0.0153	[29]
3	297.8	33.5	2.0–2.1	2.1	—			
4	342.9	65.8	7.7–8.1	1.4–1.6	—			
5	184.0	47.0	3.4–3.6	2.6–2.7	1129 + 533		0.0036	[29, 30]
					1153 + 554		0.0036	[29]
					1155 + 536		0.0038	[29, 30]
					1155 + 557		0.0041	[29]
					1200 + 448		0.0023	[29, 30]
					1203 + 477		0.0019	[29]
					1203 + 529		0.003	[30]
					1204 + 433		0.0028	[29]
6	335.2	51.0	3.9–4.3	2.4–2.6			—	
7	118.1	57.0	5.1–5.6	2.0–2.2	0645 + 609		0.0069	[29, 30]
					0840 + 503		0.0112	[29, 30]
					0849 + 515		0.0025	[29, 30]
					0851 + 589		0.0032	[29]
8	235.4	79.8	10.7–16.9	2.6–3.1	1634 + 783		0.0046	[29, 30]
9	69.0	74.9	7.5–8.9	1.6–1.9	0609 + 710		0.0141	[29, 30]
10	92.5	374.0	5.7–6.8	2.1–2.2	0609 + 710		0.0141	[29, 30]
11	314.8	57.8	5.4–5.9	2.1–2.3			—	
12	21.3	45.7	2.1	3.4	0106 + 354		0.0006	[29]

В поле поиска ливней попадают, кроме сейфертовских галактик, лацертиды и радиогалактики. Вероятности случайного попадания этих объектов в поле поиска N из K ливней приведены в табл. 4. Значения P велики и по теории вероятностей попадания могут быть случайными.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенное нами отождествление источников не согласуется с выводами работ [32, 33]. В [32] рассматривались те же ливни с $E \geq 10^{20}$ эВ, которые мы рассматривали в [25] и здесь. Однако в [32] было получено, что источниками частиц, инициировавших ливни, являются квазары с красными смещениями $0.3 \leq z \leq 2.2$. Отождествляя



Вероятность случайного попадания сейфертовских галактик [29] с разными z в поле поиска N из K ливней в группах (1) и (2): $K = 22, N = 17$ при $z \leq 0.01, N = 19$ при $z > 0.01$, поле поиска $(3\Delta\alpha, 3\Delta\delta) < 12^\circ$; (2) — $K = N = 19$, галактическая широта оси ливней $|b| > 10^\circ$, поле поиска $(3\Delta\alpha, 3\Delta\delta) < 18^\circ$

Таблица 2

Направления прихода ливней Акено и AGASA с $3.2 \cdot 10^{19} < E < 10^{20}$ эВ [4, 26], принадлежность к группе и сейфертовские галактики с $z \leq 0.0174$ в поле их поиска. Ливни пронумерованы нами. При поиске галактик предполагалось, что $(\Delta\alpha, \Delta\delta) \leq 3^\circ$

№ ливня	Координаты		Ссылка	Группа	Галактика		Ссылка
	α	δ			α	δ	
1	01 ^h 09 ^m	20°	[4]	(1,2)	01 ^h 40 ^m 13.3°	0.003	[30]
					0124 + 133	0.0174	[29, 30]
2	01 42	71	[26]	(1)	—	—	—
3	03 30	70	[26]	(1)	—	—	—
4	05 20	20	[26]	(1)	—	—	—
5	11 10	24	[26]	(1,2)	1137 + 321	0.0092	[29, 30]
					1137 + 172	0.0101	[29, 30]
6	11 12	57.8	[4]	(1, 2)	1122 + 546	0.0036	[29, 30]
7	11 27	57.3	[4]	(1, 2)	1119 + 593	0.0058	[29]
8	13 25	16	[26]	(1,2)	1254 + 219	0.0013	[29, 30]
					1304 + 133	0.0091	[29]
9	13 40	35	[26]	(1,2)	1308 + 373	0.0036	[29, 30]
					1311 + 368	0.0032	[29, 30]
					1313 + 422	0.0020	[29]
					1351 + 337	0.0079	[29, 30]
					1353 + 407	0.0089	[29]
10	14 00	50	[26]	(1,2)	1327 + 474	0.0018	[29, 30]
					1327 + 474	0.0022	[29]
					1403 + 539	0.0014	[29]
11	15 30	41	[26]	(1,2)	1524 + 418	0.0083	[29, 30]
12	18 44	47.4	[26]	(1,2)	1907 + 508	0.0080	[29, 30]
13	20 00	60	[26]	(1,2)	2036 + 659	0.006	[30]
14	21 50	28	[26]	(1,2)	2205 + 311	0.0041	[29, 30]
15	23 20	3	[26]	(1,2)	2302 + 120	0.0087	[29, 30]
					2331 + 096	0.0067	[29, 30]

Таблица 3

Вероятности P случайного попадания сейфертовских галактик с $z \leq 0.0092$ в область поиска ($3\Delta\alpha, 3\Delta\delta$) у N из K ливней с $3.2 \cdot 10^{19} < E < 10^{20}$ эВ [4, 26] в группах (1), (2) (в (1) $K = 15$, в (2) $K = 12$)

Группа	Вероятность P					
	$(\Delta\alpha, \Delta\delta) = 3^\circ$	$(\Delta\alpha, \Delta\delta) = 4^\circ$	$(\Delta\alpha, \Delta\delta) = 5^\circ$	$(\Delta\alpha, \Delta\delta) = 6^\circ$	$(\Delta\alpha, \Delta\delta) = 7^\circ$	$(\Delta\alpha, \Delta\delta) = 8^\circ$
(1)*	$2.6 \cdot 10^{-4}$	$6.7 \cdot 10^{-3}$	0.043	0.13	0.23	0.23
(2)*	$< 4 \cdot 10^{-5}$	$8.0 \cdot 10^{-5}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$7.8 \cdot 10^{-3}$	0.036	0.11
(1)**	$1.75 \cdot 10^{-3}$	0.02	0.012	0.048	0.12	0.20
(2)**	$7.0 \cdot 10^{-5}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$	$6.7 \cdot 10^{-3}$	0.023

* Поиск галактик проводился по каталогам [29, 30]; в (1) $N = 15$, в (2) $N = 12$.

** Поиск галактик проводился только по [29]; в обеих группах $N = 10$ для $\sigma_{sh} \leq 4^\circ$, $N = 12$ для $\sigma_{sh} \geq 5^\circ$.

Таблица 4

Вероятности P случайного попадания возможных источников в область поиска N из K ливней в группах (1), (2); (I) — ливни с $3.2 \cdot 10^{19} < E < 10^{20}$ эВ (якутские [10], Акено и AGASA [4, 26]), источники — сейфертовские галактики с $z \leq 0.0092$; (II) — ливни с $3.2 \cdot 10^{19} < E \leq (2-3) \cdot 10^{20}$ эВ (якутские [10], Акено и AGASA [4, 26], Хавера Парк [11]), источники — сейфертовские галактики с $z \leq 0.0092$; (III) — те же ливни, что в (II), источники — лацертиды из [30]; (IV) — те же ливни, что в (II), источники — радиогалактики из [31]

Ливни	(I)			(II)			(III)			(IV)		
	N	K	P	N	K	P	N	K	P	N	K	P
(1)*	15	19	$2.4 \cdot 10^{-3}$	18	22	$7.2 \cdot 10^{-4}$	14	22	0.12	19	22	0.18
(2)*	16	16	$1.8 \cdot 10^{-3}$	19	19	$5.9 \cdot 10^{-4}$	18	19	0.086	19	19	0.65
(1)**	15	19	$3.6 \cdot 10^{-4}$	17	22	$2.5 \cdot 10^{-4}$	—	—	—	—	—	—
(2)**	16	16	$2.5 \cdot 10^{-4}$	19	19	$3.0 \cdot 10^{-5}$	—	—	—	—	—	—

* Поиск сейфертовских галактик проводился по [29, 30].

** Поиск сейфертовских галактик проводился только по [29].

Из результатов табл. 4. следует, что основными источниками частиц с $3.2 \cdot 10^{19} < E \leq (2-3) \cdot 10^{20}$ эВ являются сейфертовские галактики с $z \leq 0.0092$, слабо излучающие в рентгеновском и радиодиапазонах.

возможные источники, авторы [32] рассматривали объекты в области среднеквадратичной ошибки вокруг оси ливня и оценивали вероятности случайного попадания объектов в эту область. Однако, как уже упоминалось, координаты частицы находятся в области среднеквадратичной ошибки с вероятностью только 66%. Возможные источники следует искать в области тройной ошибки вокруг оси ливня, где координаты частицы

Таблица 5

Ливни с $E > 10^{20}$ эВ и ближайшие сейфертовские галактики в поле их поиска.
Ливни пронумерованы нами

Ливень	Энергия, эВ	Координаты		Сейфертовские галактики		
		α	δ	α	δ	z
1 [11]*	$(1.20 \pm 0.10) \cdot 10^{20}$	$11^h 56^m \pm 12^m$	$27 \pm 2.8^\circ$	$11^h 37^m + 32.1^\circ$	0.0092	[29, 30]
				1217 + 295	0.0022	[29, 30]
				1223 + 338	0.001	[30]
				1233 + 262	0.0037	[29]
2 [11]*	$(1.05 \pm 0.08) \cdot 10^{20}$	$13^h 24^m \pm 34.8^m$	$71 \pm 2.5^\circ$	1205 + 654	0.0049	[29]
				1235 + 744	0.0067	[29]
				1339 + 679	0.0090	[29, 30]
3 [12]	$3 \cdot 10^{20}$	$06^h 20^m \pm 24^m$	$48(+5.2, -6.3)^\circ$	0645 + 609	0.0068	[29, 30]
4 [4]**	$1.1 \cdot 10^{20}$	$18^h 42^m$	48°	1907 + 508	0.0080	[29, 30]
5 [4]**	$2.1 \cdot 10^{20}$	$01^h 15^m$	21.1°	0140 + 133***	0.003	[30]
				0124 + 189	0.0174	[29, 30]

* Ошибки $\Delta\alpha$, $\Delta\delta$ взяты из [32].

** Ошибки $(\Delta\alpha, \Delta\delta) = \sqrt{2} \cdot 1.6^\circ \approx 2.3^\circ$.

*** Галактика попадает в поле поиска, если $\Delta\alpha = 2^\circ$, $\Delta\delta = 2.6^\circ$.

находятся с вероятностью 99.8%. Вероятность случайного попадания объектов в область среднеквадратичной ошибки на 2–3 порядка ниже, чем в область тройной среднеквадратичной ошибки. В работе [33] рассматривалось распределение по небу ливней с энергией $E \geq 4 \cdot 10^{19}$ эВ, зарегистрированных на установках Волкано Ренч, Хавера Парк, Сиднейской и Якутской. Авторам не удалось отождествить какие-либо внегалактические источники космических частиц. Анализируя распределение направлений прихода ливней по небу, авторы опирались на два предположения. Во-первых, для всех ливней область поиска источников составляла $\Delta\alpha \leq 3^\circ$, $\Delta\delta \leq 3^\circ$. Такое поле поиска по крайней мере в три раза меньше тройной ошибки координат для всех этих ливней. Во-вторых, предполагалось, что ядра активных галактик с $z < 0.017$, в частности сейфертовских, распределены по небу однородно. Однако распределение близких сейфертовских галактик, расположенных не далее 100 Мпк от нас ($z < 0.025$), неоднородно, как мы показали в [24, 25].

Ни в одной из наших работ мы не рассматривали в качестве возможных источников взаимодействующие галактики, в которых по [19] могут существовать условия для эффективного ускорения частиц. Причина этого следующая. Отождествляя источники в [23, 25], мы вычисляли вероятности случайного попадания объектов — возможных источников в поле поиска ливней. Во всех рассмотренных выборках ливней эта вероятность оказалась мала только для сейфертовских галактик: $P > 3\sigma$. Взаимодействующими галактиками является большинство нормальных галактик [34], а их число в десятки раз больше числа активных ядер. Поэтому вероятность случайного попадания в поле поиска ливня нормальной галактики будет много больше, чем сейфертовской. В настоящее время затруднительно отбирать по наблюдательным данным нормальные галактики, в которых существуют условия [19] для достаточно эффективного ускорения

частиц.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными источниками частиц, инициировавших ливни с энергиями $3.2 \cdot 10^{19} < E \leq 3 \cdot 10^{20}$ эВ, являются сейфертовские галактики с красными смещениями $z \leq 0.0092$, слабо излучающие в рентгеновском и радиодиапазонах. Для галактических широт $|b| > 10^\circ$ вероятность случайного совпадения координат таких галактик с направлением прихода частиц составляет $P = 3 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-4}$ в зависимости от каталога галактик. (Для любых галактических широт до $b = 0^\circ$ эта вероятность также мала, $P = (2.5 - 7.2) \cdot 10^{-4}$.) Ошибка ($\Delta\alpha$, $\Delta\delta$) в направлении прихода ливней влияет на отождествление источников. Для отождествления необходимо отбирать ливни, у которых ошибка не превышает 4° . Если отбираются ливни с $|b| > 10^\circ$, то ошибка ($\Delta\alpha$, $\Delta\delta$) может достигать 6° .

Полученные здесь результаты могут быть проверены в исследованиях на наземных установках Акено и AGASA, Мушиный глаз, Хавера Парк, а также на новых (строящихся и обсуждающихся) гигантских установках, предназначенных для исследования ливней с энергией $E \geq 10^{20}$ эВ, которые будут иметь значительно лучшее угловое (до 0.2°) и энергетическое разрешение, таких как ШАЛ-1000, Telescope Array, HiRes, Pierre Auger Project, и на спутниках [35].

Я благодарна И. Е. Слепцову, любезно предоставившему горизонтальные координаты осей 12 якутских ливней.

Литература

1. В. С. Березинский, С. В. Буланов, В. Л. Гинзбург, В. А. Догель, В. С. Птускин, в сб. *Астрофизика космических лучей*, под ред. В. Л. Гинзбурга, Наука, Москва (1990).
2. М. Н. Дьяконов, Т. А. Егоров, Н. Н. Ефимов и др., *Космическое излучение предельно высокой энергии*, Наука, Сиб. отд., Новосибирск (1991).
3. T. Stanev, P. L. Biermann, J. Lloyd-Evans et al., *Phys. Rev. Lett.* **75**, 3056 (1995).
4. N. Hayashida, K. Honda, M. Honda et al., *Phys. Rev. Lett.* **77**, 1000 (1996).
5. J. Rachen, T. Stanev, and P. Biermann, *Astron. and Astrophys.* **273**, 377 (1993).
6. F. W. Stecker, *Phys. Rev. Lett.* **80**, 1816 (1998).
7. Г. Т. Зацепин, В. А. Кузьмин, Письма в ЖЭТФ **4**, 114 (1966).
8. K. Greisen, *Phys. Rev. Lett.* **16**, 748 (1966).
9. M. M. Winn, J. Ulrichs, L. S. Peak et al., *J. Phys. G: Nucl. Phys.* **12**, 653 (1986).
10. B. N. Afanasiev, M. N. Dyakonov, V. P. Egorova et al., in *Proc. of Intern. Symp. on Extremely High Energy Cosmic Rays: Astrophysics and Future Observations*, ed. by M. Nagano, Tanashi, Tokyo, Japan (1996), p. 32.
11. A. Watson, in *Particle and Nuclear Astrophysics and Cosmology in the Next Millenium*, ed. by E. W. Kolb and R. D. Peccei, World Scientific, Singapore (1995), p. 126.
12. D. Bird, S. C. Corbato, H. Y. Dai et al., *Astrophys. J.* **441**, 144 (1995).
13. M. Takeda, N. Hayashida, K. Honda et al., *Phys. Rev. Lett.* **81**, 1163 (1998).
14. B. N. Afanasiev, M. N. Dyakonov, V. P. Egorova et al., in *Proc. 24th ICRC, Rome (1995)*, v. 2, p. 756.
15. N. Hayashida, K. Honda, M. Honda et al., in *Proc. of Intern. Symp. on Extremely High Energy Cosmic Rays: Astrophysics and Future Observations*, ed. by M. Nagano, Tanashi, Tokyo, Japan (1996), p. 17.
16. А. В. Урысон, Письма в ЖЭТФ **65**, 729 (1997).

17. А. В. Урысон, ЖЭТФ 113, 12 (1998).
18. Н. С. Кардашев, Б. В. Комберг, Частное сообщение (1998).
19. С. Cesarsky and V. Ptuskin, in *Proc. 23rd ICRC*, Calgary (1993), v. 2, p. 341.
20. V. Berezhinsky and A. Vilenkin, *Phys. Rev. Lett.* 79, 5202 (1997).
21. V. Berezhinsky, M. Kachelrieß, and A. Vilenkin, *Phys. Rev. Lett.* 79, 4302 (1997).
22. T. Totani, *Astrophys. J.* 502, L13 (1998).
23. А. В. Урысон, Письма в ЖЭТФ 64, 71 (1996).
24. А. В. Урысон, ЖЭТФ 113, 385 (1998).
25. А. В. Урысон, Изв. РАН. 63, 627 (1999).
26. N. Hayashida, K. Honda, M. Honda et al., in *Proc. 22nd ICRC*, Dublin (1991), v. 2, p. 117.
27. Дж. Сквайрс, *Практическая физика*, Мир, Москва (1971).
28. И. Е. Слепцов, Частное сообщение (1998).
29. В. А. Липовецкий, С. Н. Неизвестный, О. М. Неизвестная, *Сообщения САО*, вып. 55 (1987).
30. M. P. Veron-Cetty and P. Veron, *ESO Scientific report*, № 13 (1993).
31. H. Kühn, A. Witzel, and I. I. K. Pauliny-Toth, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 45, 367 (1981).
32. G. R. Farrar and P. L. Biermann, *Phys. Rev. Lett.* 80, 1816 (1998).
33. G. V. Khristiansen, G. V. Kulikov, G. G. C. Palumbo et al., in *Proc. 25th ICRC*, Durban (1997), v. 4, p. 201.
34. G. S. Wright, R. D. Joseph, N. A. Robertson et al., *MNRAS.* 233, 1 (1988).
35. in *Proc. 25th ICRC*, Durban (1997), v. 5.