

## НАБЛЮДЕНИЕ ПУЧКА УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТСКИХ ЧАСТИЦ И ЧЕРЕНКОВСКИЙ РЕЗОНАНС

© 2019 г. Г. Ф. Крымский<sup>1\*</sup>, М. И. Правдин<sup>1</sup>, И. Е. Слепцов<sup>1</sup>, А. Д. Красильников<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю. Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия

Поступила в редакцию 11.04.2019 г.; после доработки 21.06.2019 г.; принята к публикации 25.06.2019 г.

Ранее нами сообщалось о регистрации двумя установками широких атмосферных ливней (ШАЛ) последовательности из трех событий прихода частиц с энергиями больше  $10^{19}$  электронвольт в течение одних суток и из небольшого участка неба. Было показано, что вероятность случайного совпадения трех событий крайне мала, и высказано предположение о попадании на Землю кратковременного пучка частиц. Здесь мы уточняем энергии зарегистрированных частиц и обсуждаем возможный механизм образования пучка, объясняющий результаты наблюдений.

*Ключевые слова:* космические лучи, широкие атмосферные ливни, спектр космических лучей, пучок частиц, ударная волна

DOI: 10.1134/S032001081909002X

В работе Крымского др. (2017) мы сообщали об обнаружении кратковременного пучка частиц космических лучей с энергией выше 30 ЭэВ из компактной области неба. Две частицы зарегистрированы на Якутской комплексной установке ШАЛ (ЯКУШАЛ) (Дьяконов и др., 1991; Артамонов и др., 1994; Иванов и др., 2010) и одна в эксперименте Telescope Array (ТА) в США (Абу-Зайяд и др., 2012, Аббаси и др., 2014). Оценка вероятности случайного образования такого триплета составляет  $2.6 \times 10^{-6}$  (Крымский др., 2017). Основные параметры событий, образующих пучок, приведены в табл. 1. В этой таблице приведены дата, время регистрации события, оценка энергии ( $E$ ), зенитный угол прихода ливня ( $\theta$ ), прямое восхождение ( $\alpha$ ), склонение ( $\delta$ ), галактические широта ( $b_G$ ) и долгота ( $l_G$ ).

Обращает на себя внимание то, что энергия двух событий ЯКУШАЛ практически одинаковая, а энергия ливня ТА почти в 2 раза выше. Энергия  $E_O$  для событий Якутской установки в табл. 1 оценена по соотношению 2003 г., полученному калориметрическим методом (Глушков и др., 2003):

$$E_O = (4.6 \pm 1.2) \times 10^{17} S_{600}(0^\circ)^{0.98 \pm 0.03}, \quad (1)$$

где определяемый в эксперименте параметр  $S_{600}(0^\circ)$  — плотность частиц на расстоянии 600 м от оси ШАЛ. В последние годы было проведено

уточнение формулы (1) (Глушков и др., 2014, 2017) и получено соотношение

$$E_O = (3.6 \pm 1.0) \times 10^{17} S_{600}(0^\circ)^{1.02 \pm 0.03}. \quad (2)$$

Формула (2) мало меняет оценку энергии событий Якутской установки в пучке, уменьшение константы компенсируется увеличением степенной зависимости от экспериментального параметра  $S_{600}$ . В табл. 2 приводятся соотношения между энергией ливня ТА и разными оценками событий ЯКУШАЛ — в первых двух столбцах энергия определена по формуле (1), как и в табл. 1, в третьем и четвертом столбцах использовалась уточненная формула (2), а в последних — энергия по формуле (2) умножена на коэффициент 0.8.

В обоих экспериментах имеются систематические ошибки определения энергии. Для Якутской установки они около 25% (Глушков и др., 2003), для Telescope Array 20% (Абу-Зайяд и др., 2012), поэтому возможно систематическое расхождение энергетической шкалы между установками. На наличие такого эффекта указывает разница интенсивности в энергетическом спектре при хорошем согласии самой формы (Глушков и др., 2014, 2017). На рис. 1 приведено сравнение спектра Якутской установки (Глушков и др., 2014) и Telescope Array (Абу-Зайяд и др., 2012) в области энергий выше 10 ЭэВ. Точки Якутской установки (красные квадратики) лежат выше, чем ТА (черные кружки). Если уменьшить оценку энергии Якутских событий с коэффициентом 0.8, то результаты обоих

\*Электронный адрес: sleptsov@ikfia.ysn.ru

**Таблица 1.** Параметры трех ливневых событий, образующих пучок

Дата	Время, UTC	$E$ , ЭэВ	$\Theta$ , град	$A$ , град	$\Delta$ , град	$b_G$ , град	$l_G$ , град
21.01.2009 г.	23:40:35	36.3	35.5	356.3	65.8	4.0	116.5
22.01.2009 г.	10:51:52	35.5	42.7	333.3	62.3	4.9	105.9
22.01.2009 г.	22:54:22	57.9	31.27	311.15	51.06	5.06	89.47

**Примечание.** Первые две строки — ШАЛ, зарегистрированные на Якутской установке, третья строка — событие Telescope Array (Аббаси и др., 2014).

**Таблица 2.** Отношения энергии события Telescope Array (Аббаси и др., 2014) к энергии ШАЛ Якутской установки для разных оценок энергии

$E_{2003}$	$E_{TA}/E_{2003}$	$E_{2014}$	$E_{TA}/E_{2014}$	$E_C = E_{2014} \times 0.8$	$E_{TA}/E_C$
36.3	1.60	34.2	1.69	27.4	2.12

установок хорошо согласуются между собой (зеленые ромбы). Это указывает на то, что такое уменьшение более точно согласует энергетическую шкалу ЯКУШАЛ и ТА. С учетом такой поправки с большой вероятностью энергия ливня ТА в 2 раза выше, чем энергия обоих событий ЯКУШАЛ (см. последний столбец табл. 2).

Вероятный механизм формирования таких пучков представляет собой взаимодействие космических лучей с релятивистской ударной волной (Ачтерберг и др., 2001; Каприоли, 2015). Если волна несёт сильное магнитное поле, то она захватывает частицы космических лучей сверхвысоких энергий, а затем переизлучает их. При этом интенсивность частиц на оси формируемого пучка возрастает пропорционально лоренц-фактору волны ( $\gamma$ ) в степени больше 8 (Крымский др., 2017).

Таким образом, в качестве возможного источника ка ультрарелятивистских частиц мы рассматриваем нестационарные релятивистские струи. Передний фронт формирующейся струи с точки зрения наблюдателя может считаться субсветовым точечным источником частиц.

Генетическая связь всех трех частиц возможна, только если они испущены точечным источником — размеры источника не превосходят одних световых суток. Этому противоречат небесные координаты точек прихода частиц. Угловое расстояние между первой и третьей точками составляет  $27^\circ$ . Согласовать гипотезу о точечном источнике с наблюдавшимися событиями возможно, только предположив, что источник двигался. На рис. 2 показаны кружками небесные координаты всех трех событий в экваториальной системе. Размеры кружков примерно соответствуют экспериментальным ошибкам. Линия и точки на ней представляют собой наилучшую подгонку параметров в предположении, что видимый источник частиц двигался с постоянной угловой скоростью. Видно,

что гипотезу о движении источника действительно можно согласовать с наблюдениями. Если бы три события совпали случайно, то такое упорядоченное расположение координат было бы маловероятным. Это укрепляет нашу гипотезу о том, что наблюдался пучок.

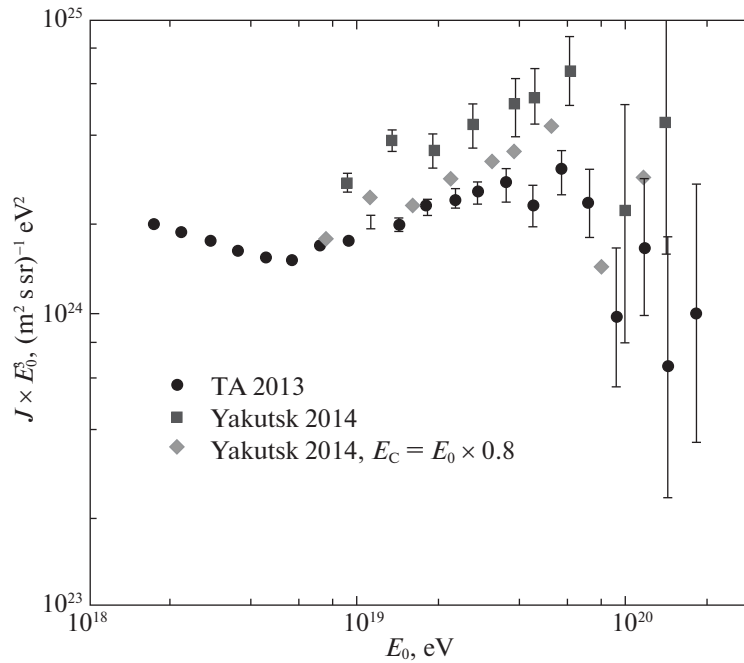
Однако, принимая во внимание, что все явление продолжалось в течение суток, приходится заключить, что скорость источника намного превышала скорость света. Подобный парадокс впервые обсуждался в литературе в 1966 г. (М. Рис, 1966), и он объясняется кинематикой релятивистского источника, движущегося по направлению к наблюдателю. В нашем случае этот эффект многократно усиливается механизмом, который мы называем черенковским резонансом. Суть механизма состоит в том, что траектории испускаемых источником частиц сверхвысоких энергий искривляются в крупномасштабном магнитном поле, которое естественно предполагать в пространстве между источником и наблюдателем. Средняя по лучу зрения скорость частиц может стать заметно меньше скорости света и меньше скорости источника. Тогда некоторые частицы, испущенные источником на определенном отрезке пути, придут к наблюдателю одновременно, в виде пучка.

Пусть случайное магнитное поле  $B$  имеет основной масштаб  $X$ , тогда траектории частиц с энергией  $\varepsilon$  в пределах масштаба искривлены, и радиус кривизны

$$R(\theta) = \frac{\varepsilon}{eB \sin^2 \theta},$$

где  $e$  — заряд частиц (предполагается, что частицы однозарядны),  $\theta$  — угол между направлением поля и траекторией частицы.

В пределах масштаба относительное уменьшение скорости частицы за счет удлинения пути со-



**Рис. 1.** Сравнение энергетического спектра по данным Telescope Array (черные кружки) и Якутской установки (черные квадраты). Светлыми ромбами показан результат Якутской установки, если оценку энергии ШАЛ уменьшить на 20%.

ставит

$$\mu(\theta) = \frac{X}{2R(\theta) \arcsin(X/2R(\theta))}.$$

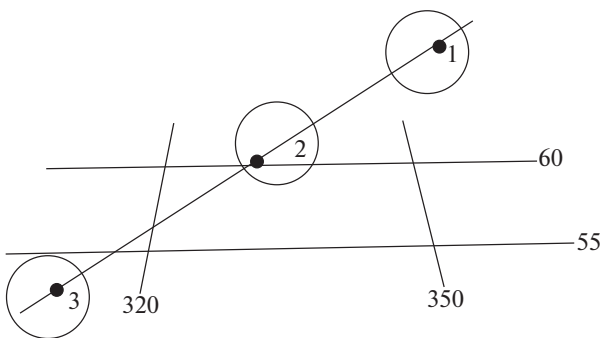
Если  $R \gg X$ , то

$$\mu(\theta) = 1 - \frac{1}{6} \left( \frac{X}{2R(\theta)} \right)^2.$$

В случае изотропного в среднем поля усреднение по  $\theta$  дает

$$\mu = 1 - \frac{\varepsilon_0^2}{\varepsilon^2}, \quad \varepsilon_0 = eBX/3\sqrt{5}.$$

Рассмотрим движение источника со скоростью  $\beta$  (скорость света = 1) из точки на расстоянии  $L_0$  от



**Рис. 2.** Небесные координаты зарегистрированных трех событий на экваториальной системе (кружки). Размеры кружков соответствуют экспериментальным ошибкам. Линия и точки — наилучшая подгонка траектории движущегося с постоянной угловой скоростью источника.

наблюдателя под углом  $\varphi$  к лучу зрения (рис. 3). Пройдя путь  $S$ , источник переместится на угол  $\theta$  и будет на расстоянии  $L$  от наблюдателя. Время будем отсчитывать от момента, когда источник находился в исходной точке. Частица, испущенная источником в положении  $\theta$ , придет к наблюдателю в момент

$$t = \frac{S(\theta)}{\beta} + \frac{L(\theta)}{\mu} = \frac{L_0}{\sin(\theta + \varphi)} \left( \frac{\sin \theta}{\beta} + \frac{\sin \varphi}{\mu} \right).$$

Частицы будут резонансными, когда будет

$$\frac{\partial t}{\partial \theta} = 0.$$

Это условие выполняется при

$$\mu = \mu_{\text{рез}} = \beta \cos(\theta + \varphi).$$

Время прихода резонансных частиц

$$t_{\text{рез}} = \frac{L_0 \cos \theta}{\beta \cos(\theta + \varphi)}.$$

Пусть резонансные частицы испущены в начальный момент  $\theta = 0$ , для них

$$\mu_{\text{рез}} = \beta \cos \varphi, \quad t_{\text{рез}} = L_0 / \beta \cos \varphi.$$

Частицы, испускаемые в других точках, также могут прийти к наблюдателю в момент  $t_{\text{рез}}$ , будем называть их синхронными. Синхронные частицы должны иметь другую скорость  $\mu$  (и другую энергию), не совпадающую со скоростью резонансных частиц,

$$\mu_{\text{синх}} = \beta \frac{\cos \varphi}{\cos \theta}.$$

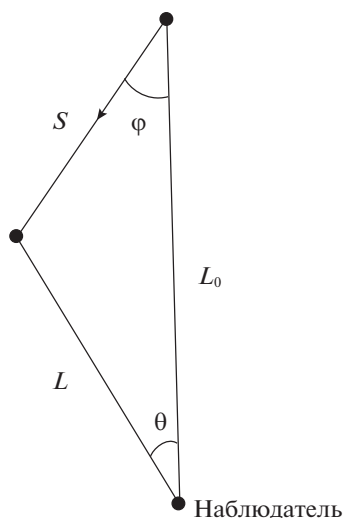


Рис. 3. Схема взаиморасположения луча зрения наблюдателя ( $L_0$ ,  $L$ ) и траектории движения источника ( $S$ ).

Реальный источник, испустивший зарегистрированные частицы, прошел путь на небесной сфере, равный  $27^\circ$ . Расположим начальную точку  $\theta = 0$  в середине этого отрезка, а концы интервала будут иметь координаты  $\theta_{\pm} = \pm 13.5^\circ$ . Примем  $\varphi = 20^\circ$ ,  $\beta = 0.98$ . Тогда параметры резонансных частиц будут  $\mu = 0.921$ ,  $\varepsilon = 3.55\varepsilon_0$ , а у синхронных частиц, испущенных в концах интервала, соответственно  $\mu = 0.947$ ,  $\varepsilon = 4.34\varepsilon_0$ . Энергия у синхронных частиц на 20% больше, чем у резонансных. Эта разница не слишком велика, и тем и другим можно приписывать одинаковую энергию. В действительности речь идет не об энергии, а о магнитной жесткости. Энергия одной из трех зарегистрированных частиц в 2 раза выше, и можно предполагать, что это была альфа-частица, тогда как две другие были протонами, и все три имели примерно одну и ту же магнитную жесткость.

Таким образом, три частицы, зарегистрированные установками ШАЛ, могли быть испущены одним источником, двигавшимся с субсветовой скоростью в направлении Солнечной системы. Замедление частиц в магнитных полях при этом создавало условия для черенковского резонанса. Различие в магнитных жесткостях частиц не должно быть большим, и отсюда вытекает, что одна из них могла быть альфа-частицей, а две другие — протонами.

Явление черенковского резонанса аналогично формированию каустик в оптике и должно иметь общий характер. В частности, можно предполагать, что кратковременные гамма-всплески также выступают как проявления черенковского резонанса.

Работа поддержана программой Президиума РАН №23 “Физика высоких энергий и ней-

тринная астрофизика” и Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 16-29-13019 офи-м).

Авторы благодарят рецензента за детальный анализ и критику. Наша работа несколько раз была им отвергнута или рекомендована к доработке. Представленный текст значительно отличается от первоначального варианта.

Авторы также благодарны всему коллективу Якутской установки ШАЛ, обеспечивающему ее работоспособность уже более 40 лет.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абу-Зайяд и др., 2012 (Т. Abu-Zayyad, R. Aida, M. Allen, R. Anderson, R. Azuma, E. Barcikowski, J.W. Belz, D.R. Bergman, et al.), Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A **689**, 87 (2012).
2. Аббаси и др. (R.U. Abbasi, M. Abe, T. Abu-Zayyad, M. Allen, R. Anderson, R. Azuma, E. Barcikowski, J.W. Belz, et al.), Astrophys. J. Lett. **790**, L21 (2014) (arXiv:1404.3890v3).
3. Артамонов В.П., Афанасьев Б.Н., Глушков А.В., Григорьев В.М., Дьяконов М.Н., Егоров Т.А., Егорова В.П., Ефремов Н.Н. и др., Изв. РАН. Сер. Физич. **58**, 92 (1994) [V.P. Artamonov et al., Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **58**, 2026 (1994)].
4. Ачтерберг и др. (A. Achterberg, Y.A. Gallant, J.K. Kirk, and A.W. Guthmann), MNRAS **328**, 393 (2001).
5. Глушков и др. (A.V. Glushkov, A.A. Ivanov, S.P. Knurenko, V.A. Kolosov, I.T. Makarov, M.I. Pravdin, I.Ye. Slepsov, and G.G. Struchkov), Proc. 28th ICRC 393 (2003).
6. Глушков и др. (A.V. Glushkov, M.I. Pravdin, and A. Saburov), Phys. Rev. D **90**, 012005 (2014).
7. Глушков и др. (A.V. Saburov, A.V. Glushkov, M.I. Pravdin, Yu.A. Egorov, A.A. Ivanov, S.P. Knurenko, A.D. Krasilnikov, I.T. Makarov, et al.), Proceed. Science PoS(ICRC2017) 552 (2017).
8. Дьяконов М.Н., Ефимов Н.Н., Егоров Т.А., Иванов А.А., Колосов В.А., Михайлов А.А., Правдин М.И., Слепцов И.Е. *Космическое излучение предельно высокой энергии* (Новосибирск: Наука, 1991), с. 254.
9. Иванов А.А., Кнуренко С.П., Правдин М.И., Слепцов И.Е., Вестник Московского университета. Физика. Астрономия. № 4, 55 (2010) [A.A. Ivanov et al., Moscow Univer. Phys. Bull. **65**, No. 4, 292 (2010)].
10. Каприоли (D. Caprioli), Astrophys. J. Lett. **811**, L38 (2015), doi: 10.1088/2041-8205/811/2/L38.
11. Крымский Г.Ф., Правдин М.И., Слепцов И.Е., Письма в Астрон. журн. **43**, 779 (2017) [G.F. Krymsky et al., Astron. Lett. **43**, 703, (2017)].
12. Рис (M.J. Rees), Nature **211**, 468 (1966).