

Аномальные корреляции космических лучей, пересмотренные с использованием полной по всему небу выборки лацертид

М. А. Куденко¹⁾, С. В. Троицкий

Институт ядерных исследований РАН, 117312 Москва, Россия

Физический факультет, МГУ имени М. В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия

Поступила в редакцию 5 января 2024 г.

После переработки 15 января 2024 г.

Принята к публикации 18 января 2024 г.

Космические лучи с энергиями выше 10^{19} эВ, наблюдавшиеся в 1999–2004 гг. экспериментом High Resolution Fly's Eye (HiRes) в стереоскопическом режиме, оказались коррелирующими с направлениями на удаленные лацертиды, что указывало на существование нестандартных нейтральных частиц, проходящих космологические расстояния без поглощения. Этот эффект не мог быть проверен более новыми экспериментами из-за их низкого углового разрешения. Было обнаружено, что распределение в небе лацертид, связанных с космическими лучами, отклоняется от изотропного, что может дать ключ к интерпретации наблюдаемой аномалии. Однако в предыдущих исследованиях использовалась выборка лацертид, которая сама по себе была анизотропной, что усложняло интерпретацию. Здесь мы используем недавно составленную изотропную полную выборку лацертид и те же данные HiRes, чтобы подтвердить наличие корреляций и усилить аргументы в пользу согласованности распределения коррелирующих событий на небе с местной крупномасштабной структурой Вселенной. Дальнейшие проверки аномалии ожидают новых точных данных о космических лучах.

DOI: 10.31857/S123456782405001X, EDN: ADIARJ

1. Введение. Два десятилетия назад были обнаружены загадочные корреляции между направлениями прихода космических лучей сверхвысоких энергий, зарегистрированных экспериментом High Resolution Fly's Eye (HiRes), и лацертидами [1]. Лацертиды, составляющие подкласс блазаров, – это активные ядра галактик с направленными в сторону наблюдателя джетами; они расположены на космологических расстояниях. Хотя ускорение космических частиц в них вполне вероятно, заряженные ядра отклоняются космическими магнитными полями, в то время как угловые расстояния между направлениями прихода событий HiRes и этими источниками значительно меньше ожидаемых отклонений. При этом в Стандартной модели физики частиц отсутствуют нейтральные частицы, способные достичь наблюдателя с такого большого расстояния [2]. Это вызвало несомненный интерес к наблюдению, которое потребовало объяснений в терминах “новой физики”.

Подтвержденные в [3], где использовались неопубликованные данные HiRes, с тем же самым предварительным p -числом 2×10^{-4} , соответствующим $p \sim 10^{-3}$ после учета сделанных попыток,

корреляции [1] остаются не проверенными другими экспериментами и не объясненными однозначно. Причина отсутствия проверок заключается в том, что ни один из современных экспериментов не достигает углового разрешения стереоскопического HiRes, где, согласно моделированию Монте-Карло, 68 % событий восстанавливались в пределах 0.55° от истинного направления их прихода, а 95 % – в пределах 1.26° [4]. В новых экспериментах расстояние между детекторами увеличивалось, чтобы покрыть большую эффективную площадь, что ухудшило их угловое разрешение. Единственная попытка проверить результаты [1, 3] была представлена на конференции [5], но не давала однозначных выводов. Действительно, в [6] оценивалось количество событий, необходимое для проверки корреляций [1] различными экспериментами, регистрирующими космические лучи. Для наземной решетки детекторов обсерватории имени Пьера Оже это число составило около 3500, в то время как в исследовании [5] использовалось только 1672 события. Другие трудности, связанные с этой проверкой, обсуждаются, например, в [7, 8].

Такая ситуация вынуждает использовать исходные данные, чтобы получить максимум информации об этих корреляциях. Ключи к интерпретации мо-

¹⁾e-mail: kudenko.ma19@physics.msu.ru

гут быть найдены либо с астрофизической стороны (какие лацертиды связаны с космическими лучами и чем они отличаются от других), либо со стороны космических частиц (какие события связаны с лацертидами, что можно сказать об их типах их первичных частиц или о распределении направлений их прихода).

Астрофизический подход был использован в работе [9], где было установлено, что в корреляциях доминирует определенный класс лацертид, отобранных по их широкополосному (оптика–рентген) спектральному индексу, связанному с их физическими свойствами. Информация о типе первичных частиц коррелирующих событий не может быть получена из открытых данных и не обсуждается в работе [3]. Глобальное распределение направлений прихода изучалось в работе [8], и именно к нему мы возвращаемся в настоящей работе.

Объяснить наблюдаемые корреляции непросто, даже с помощью новой физики. Многообещающую возможность предоставляют аксионоподобные частицы (ALP) с определенными параметрами, которые смешиваются с фотонами во внешнем магнитном поле и распространяются без поглощения на космологические расстояния, см., например, обзоры [10, 11]. Преобразование энергичных фотонов в ALP в магнитном поле галактики источника с последующим обратным преобразованием в фотоны в поле Млечного Пути было предложено для объяснения наблюдений аномальных энергичных гамма-лучей от блазаров, см., например, [12], и недавнего гамма-всплеска GRB 221009A, см. например, [13]. Переходы в галактических магнитных полях подавлены для сверхвысоких энергий, обсуждаемых в данной статье, но возможны в более слабых полях в скоплениях галактик и филаментах крупномасштабной структуры (LSS) Вселенной [7]. Предсказанием этого сценария является кластеризация коррелирующих событий в направлении локальной структуры LSS, которая и была обнаружена в работе [8].

Одной из сложностей поиска анизотропии коррелированных событий является внутренняя анизотропия неполного каталога лацертид [14], использованного в предыдущих исследованиях. Будучи компиляцией всех доступных на тот момент данных, он охватывает различные области неба с неоднородной, не документированной чувствительностью. Помимо земных причин анизотропии (разные поля зрения телескопов), существует значительная галактическая анизотропия, вызванная поглощением вблизи галактической плоскости (объекты в [1] были отобраны по их наблюдаемой звездной величине,

без поправки на поглощение) и трудностью спектральных наблюдений, необходимых для определения природы источника, в этой области неба. В целом эти анизотропии не имеют никакого отношения к LSS и вряд ли могут повлиять на выводы исследования, однако этого нельзя исключить. Например, одним из подозреваемых виновников такого эффекта является случайная почти перпендикулярная ориентация галактической и сверхгалактической плоскостей: из-за этого доля направлений, попадающих в зону избегания, меньше для локального филамента по сравнению с полным полем зрения HiRes.

С целью избежать таких трудно контролируемых погрешностей, мы недавно составили новый каталог оптически ярких блазаров [15] с изотропным покрытием всего неба. В рамках этого проекта была определена выборка подтвержденных лацертид по тем же критериям, которые использовались в [14], более подробно описанным в [16]. Здесь мы используем эту изотропную выборку для проверки связанного с LSS паттерна [8] в распределении лацертид, коррелирующих с космическими лучами, зарегистрированными HiRes. Также мы сделаем некоторые замечания относительно будущих проверок корреляций с новыми данными о космических лучах.

2. Выборки космических лучей и лацертид.

В настоящем исследовании мы используем ту же выборку направлений прихода 271 события, обнаруженного HiRes стерео [17], которая была использована в [1, 8, 9] и, с добавлением неопубликованных событий низких энергий, в [3]. Подробности об этой выборке можно найти в [4, 17], но никакой информации об отдельных событиях, кроме направлений прихода, опубликованных в виде графика в формате Postscript, там не представлено.

Используемая нами выборка лацертид описана в [15]. Она была построена на основе каталогов блазаров всего неба, отобранных с помощью радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) и наблюдений в гамма-диапазоне. Выборка представляет собой комбинацию двух полных выборок, ограниченных по потоку на 8 ГГц по РСДБ и выше 1 ГэВ, соответственно.

Отбор оптически ярких источников, мотивированный критериями, использованными в [1], и не связанный с полнотой изотропной выборки, проводился на основе звездной величины G -диапазона GAIA DR3, скорректированной на галактическое поглощение, $G_{\text{corr}} < 18^m$. В выборку вошло 336 источников, и их распределение по небу удовлетворяет количественным критериям изотропии, описанным в [15].

Для сравнения мы также используем исходную выборку из 156 подтвержденных лацертид, отобранных из каталога [14] по критерию, связанному с их звездной величиной, $V < 18^m$ без поправки на поглощение. Полосы V и G соответствуют одинаковым длинам волн, хотя последняя из них несколько шире.

3. Космические лучи HiRes, коррелирующие с новой выборкой лацертид.

3.1. Корреляции по направлениям. Мы начинаем с повторения оригинального анализа точно таким же образом, как в [1], но с новым каталогом лацертид. Для заданного угла θ подсчитывается количество пар “направление прихода события HiRes – лацертида”, разделенных углом $\leq \theta$. Затем та же процедура повторяется для большого числа смоделированных наборов направлений прихода и определяется p -значение, измеряющее, насколько часто это или большее число пар может наблюдаться случайно. Обратим внимание, что смоделированные направления прихода не изотропны, а следуют экспозиции HiRes стерео; подробности моделирования см. в [1]. Как и в [1], мы рассматриваем $0^\circ \leq \theta \leq 5^\circ$ с шагом 0.1° .

Результаты анализа подсчета пар показаны на рис. 1, где для сравнения также представлены результаты [1]. Мы не пытаемся оценить здесь окончательное p -значение, поскольку обе выборки сильно перекрываются (52 из 156 объектов старой выборки присутствуют в новом каталоге), а корреляции уже были установлены в работах [1, 3]. Вместо этого отметим, что предварительные p -значения для обеих выборок одного порядка, несмотря на различия в каталогах, и что минимумы соответствуют немного разным значениям θ в диапазоне от 68 % CL до 95 % CL углового разрешения HiRes. Хотя для $\theta = 0.8^\circ$, выделенного в [1], в каждом из двух каталогов найдено по 11 пар, эти лацертиды не совсем одинаковы: только 7 из 11 присутствуют в обеих выборках. В то же время фон в новой выборке больше, поскольку она содержит больше объектов, и p -значения соответственно выше. Это может быть связано с корреляциями с LSS: “новые” лацертиды в изотропном каталоге расположены в зонах, недостаточно покрытых в старом, в частности, вокруг галактической плоскости. Но, как мы уже отмечали, галактическая плоскость почти перпендикулярна местному филаменту, поэтому доля коррелированных источников среди этих вновь добавленных источников может быть меньше, чем в [14].

3.2. Выборка по индексу “оптика–рентген”. Для полноты мы также проводим подсчет пар с подвыборкой лацертид, отобранной из изотропной выборки

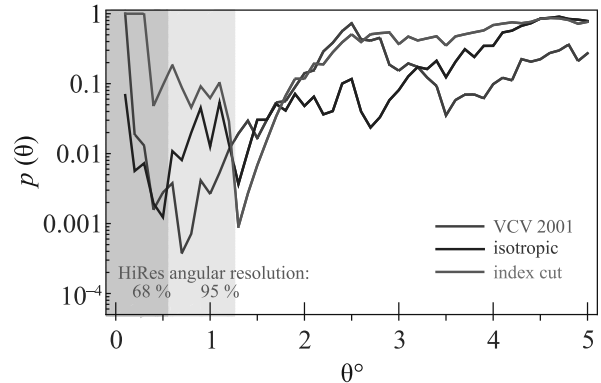


Рис. 1. (Цветной онлайн) Предварительное p -значение случайных ассоциаций космических лучей HiRes stereo с тремя выборками лацертид, как функция угла раствора конуса поиска θ . Красная пунктирная линия соответствует выборке из [14], использованной в [1]; синяя сплошная линия – изотропной выборке [15], использованной здесь; зеленая пунктирная линия – подвыборке, отобранной по спектральному индексу оптика–рентген, см. текст. Закрашенная область соответствует углам раствора, содержащим 68 % (темные) и 95 % (светлые) событий HiRes [4]

по условию $\alpha_{\text{OX}} < 1$, где α_{OX} – спектральный индекс “оптика–рентген”, определенный и исследованный в работе [9]. Таких объектов оказалось 73, и действительно, в согласии с [9], минимальное p -значение для этой выборки ниже, чем для полной. Этот результат также представлен на рис. 1. Заметим, однако, что эта подвыборка не является изотропной из-за сильно неравномерной экспозиции рентгеновских телескопов, в результате чего для многих источников в определенных областях неба рентгеновские потоки неизвестны.

3.3. Распределение коррелирующих направлений на небе. Теперь мы переходим к основной теме настоящего исследования и используем изотропную выборку лацертид для поиска паттерна LSS в распределении коррелирующих направлений прихода космических лучей на небе. Следуя [8], мы используем взвешенную плотность галактик f из трехмерного каталога Two Micron All Sky Survey [18, 19] в качестве шаблона LSS. Детали построения шаблона, выполненного по аналогии с [20, 21], описаны в [8]. Отметим, что все лацертиды расположены далеко за пределами LSS, на расстояниях от ~ 150 Мпк до нескольких гигапарсеков, в то время как типичные расстояния, дающие вклад в шаблон, составляют $\lesssim 30$ Мпк. Корреляции с источниками, расположенными так далеко, оправдывают пренебрежение любым поглощением на ~ 30 Мпк, принятое при расчете f в [8].

На рисунке 2 представлена карта неба с коррелирующими лацертидами, отмеченными на фоне этого шаблонного распределения. Видно, что, как и в работе [9], коррелирующие источники, как правило, попадают в более темные теневые области, соответствующие большим значениям f . Это подтверждается статистическим исследованием с использованием метрики Колмогорова–Смирнова для двух наборов значений f – для коррелирующих лацертид и для всех событий HiRes. Полученная вероятность того, что 19 пар “лацертида–космический луч”, разделенных не более, чем на 95 % CL угловое разрешение, следуют тому же распределению f , что и весь набор данных HiRes, составила 3.9×10^{-3} . Аналогичное значение для выборки, использованной в [1], составляет 2.6×10^{-3} . Таким образом, несмотря на добавление в каталог множества новых источников, паттерн LSS в распределении событий, совпадающих с лацертидами, остается неизменным. Заметим, что это справедливо только для космических лучей, связанных с лацертидами: для всей выборки HiRes корреляции с LSS не обнаружены [22].

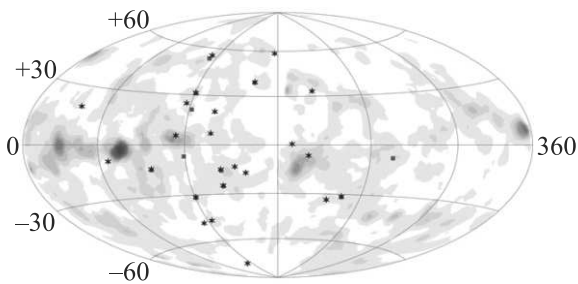


Рис. 2. (Цветной онлайн) Карта неба с положением лацертид, ассоциированных с космическими лучами HiRes (сверхгалактические координаты). Красные квадратики: выборка, использованная в [1], $\theta = 0.8^\circ$. Синие звезды: изотропная выборка, $\theta = 1.3^\circ$. Затенение показывает взвешенную плотность галактик [8]

4. Выводы. Мы использовали недавно составленную изотропную по всему небу выборку из 336 оптически отобранных подтвержденных лацертид для повторного изучения аномальных корреляций космических лучей HiRes стерео с источниками этого класса. Оказалось, что корреляции схожи с первоначально использовавшейся сильно анизотропной выборкой. Формальная значимость эффекта не рассчитывается для нового каталога, поскольку это исследование не является статистически независимым от первоначального. Предварительные p -значения немного выше, чем для выборки, использованной в [1, 3], что хорошо согласуется с нашими ожиданиями, обсуждаемыми выше. Условие для спектрально-

го индекса “оптика–рентген”, $\alpha_{\text{ОХ}} < 1$, предложенное в [9], эффективно отбирает лацертиды, связанные с космическими лучами, в обеих выборках. Главным результатом, для которого важна изотропность выборки, является подтверждение ранее установленной [8] связи с LSS в распределении коррелирующих событий по небу, которая отсутствует для всей выборки космических лучей, но предсказывается объяснением аномалии, связанным с ALP.

Хотя низкое угловое разрешение современных обсерваторий космических лучей не позволяет прямо проверить описанные здесь эффекты с помощью новых данных, большая статистика, собранная этими экспериментами, может помочь частично преодолеть эту трудность. В ближайшем будущем проверка корреляций лацертид с космическими лучами может быть проведена, в частности, с помощью данных, собранных экспериментом Telescope Array [23], который является преемником HiRes. Для точной оценки чувствительности ожидаемого анализа и уточнения грубых оценок, приведенных в работе [6], необходимо специальное моделирование, включающее специфические детали эксперимента. Настоящее исследование позволяет нам сделать несколько замечаний, которые могут быть полезны при планировании стратегии этих проверок.

- Важно повторить тест на подсчет пар с тем же набором лацертид, который использовался для установления корреляций [1], и с той же процедурой.
- Конкретный угол θ , при котором корреляции наиболее значимы, зависит от доли событий, приходящих от лацертид, и от доли лацертид в наборе источников космических лучей. Оба этих числа малы и сильно флуктуируют, поэтому имеет смысл рассмотреть различные значения θ .
- Для проверки корреляции событий с LSS рекомендуется использовать изотропную выборку источников.
- Учитывая, что паттерн LSS был предсказан в сценарии ALP, и что другое предсказание в этом случае состоит в том, что первичными частицами являются фотоны, было бы важно исследовать возможное содержание фотонов в коррелирующих событиях. Однако возможны и другие объяснения, и любая информация о типах первичных частиц в связанных с лацертидами событиях помогла бы сделать выбор между сценариями.

Авторы признательны М. Кузнецову и Г. Рубцову за интересные и полезные обсуждения, а также трем анонимным рецензентам за полезные комментарии.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант 22-12-00253.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует. Авторы получили поддержку от Российского научного фонда.

1. D. S. Gorbunov, P. G. Tinyakov, I. I. Tkachev, and S. V. Troitsky, JETP Lett. **80**, 145 (2004).
2. P. G. Tinyakov and I. I. Tkachev, JETP **106**, 481 (2008).
3. R. U. Abbasi, T. Abu-Zayyad, J. F. Amann et al. (HiRes collaboration), Astrophys. J. **636**, 680 (2006).
4. C. B. Finley, *Anisotropy of arrival directions of ultrahigh energy cosmic rays. PhD thesis*, Columbia U., N.Y. (2006).
5. D. Harari, in 30th International Cosmic Ray Conference **4**, 283 (2008).
6. D. S. Gorbunov, P. G. Tinyakov, I. I. Tkachev, and S. V. Troitsky, JCAP **01**, 025 (2006).
7. M. Fairbairn, T. Rashba, and S. V. Troitsky, Phys. Rev. D **84**, 125019 (2011).
8. S. Troitsky, Eur. Phys. J. C **81**, 264 (2021).
9. S. V. Troitsky, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **388**, L79 (2008).
10. S. V. Troitsky, JETP Lett. **105**, 55 (2017).
11. G. Galanti and M. Roncadelli, Universe **8**, 253 (2022).
12. M. Simet, D. Hooper, and P. D. Serpico, Phys. Rev. D **77**, 063001 (2008).
13. S. V. Troitsky, Pis'ma v ZhETF **116**, 745 (2022).
14. M. P. Véron-Cetty and P. Véron, Astron. Astrophys. **374**, 92 (2001).
15. M. Kudenko and S. Troitsky, arXiv:2312.07508 (2023).
16. M. P. Veron-Cetty and P. Veron, Astron. Astrophys. Suppl. Ser. **100**, 521 (1993).
17. R. U. Abbasi, T. Abu-Zayyad, J. F. Amann et al. (HiRes collaboration), Astrophys. J. Lett. **610**, L73 (2004).
18. J. P. Huchra, L. M. Macri, K. L. Masters et al. (2MASS), Astrophys. J. Suppl. **199**, 26 (2012).
19. L. Macri, R. Kraan-Korteweg, and T. Lambert et al. (2MASS), Astrophys. J. Suppl. **245**, 6 (2019).
20. H. B. J. Koers and P. Tinyakov, JCAP **04**, 003 (2009).
21. H. B. J. Koers and P. Tinyakov, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **399**, 1005 (2009).
22. R. U. Abbasi, T. Abu-Zayyad, M. Allen et al. (HiRes collaboration), Astrophys. J. Lett. **713**, L64 (2010).
23. H. Kawai, S. Yoshida, H. Yoshii et al. (Telescope Array collaboration), Nucl. Phys. B Proc. Suppl. **175–176**, 221 (2008).