

27. Еникеев Р И и др. *ЯФ* **46** 1492 (1987) [Enikeev R I et al. *Sov. J. Nucl. Phys.* **46** 883 (1987)]
28. Hirata K S et al. *Phys. Lett. B* **280** 146 (1992)
29. Alexeyev E N et al., in *Proc. of the 16th Intern. Cosmic Ray Conf., Kyoto, Japan, 1979* Vol. 10 (Ed. S Miyake) (Tokyo: Institute for Cosmic Ray Research, Univ. of Tokyo, 1979) p. 282
30. Воеводский А В, Дадькин В Л, Рязжская О Г *ПТЭ* (1) 85 (1970)
31. Дадькин В Л "К истории сооружения Басканского подземного синтиллиационного телескопа", Препринт № 1297/2011 (М.: ИЯИ РАН, 2011)
32. Korchagin P V et al., in *Proc of the 16th Intern. Cosmic Ray Conf., Kyoto, Japan, 1979* Vol. 10 (Ed. S Miyake) (Tokyo: Institute for Cosmic Ray Research, Univ. of Tokyo, 1979) p. 299
33. Badino G et al. *Nuovo Cimento C* **7** 573 (1984)
34. Aglietta M et al. *Nuovo Cimento A* **105** 1793 (1992)
35. Aglietta M et al. (LVD Collab.), in *Proc. of 27th Intern. Cosmic Ray Conf., Hamburg, Germany, 2001* Vol. 3 (Hamburg: Copernicus Gesellschaft, 2001) p. 1093
36. Rhode W et al. *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **35** 250 (1994)
37. Rhode W et al. (Fréjus Collab.) *Astropart. Phys.* **4** 217 (1996)
38. Aglietta M et al. (NUSEK Collab.) *Europhys. Lett.* **8** 611 (1989)
39. Goodman M C et al. *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **38** 337 (1995)
40. Goodman M C et al., in *Proc. of the 26th Intern. Cosmic Ray Conf., Salt Lake City, Uta, USA, 1999* Vol. 2 (Eds D Kieda, M Salamon, B Dingus) (Melville, N.Y.: AIP, 2000) p. 151
41. Ahlen S et al. (MACRO Collab.) *Phys. Rev. D* **46** 4836 (1992)
42. Becker-Szendy R et al. *Phys. Rev. D* **46** 3720 (1992)
43. Fukuda Y et al. (Super-Kamiokande Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **81** 1562 (1998)
44. Bugaev E V et al. *Phys. Rev. D* **58** 054001 (1998)
45. Aglietta M et al. (The LVD Collab.) *ЯФ* **66** 125 (2003) [*Phys. Atom. Nucl.* **66** 123 (2003)]
46. Зацепин Г Т и др. *ЯФ* **49** 426 (1989) [Zatsepin G T et al. *Sov. J. Nucl. Phys.* **49** 266 (1989)]
47. Ryazhskaya O G *Nuovo Cimento C* **19** 655 (1996)
48. Понтекорво Б М *ЖЭТФ* **34** 247 (1958) [Pontecorvo B M *Sov. Phys. JETP* **7** 172 (1958)]
49. Bahcall J N *Neutrino Astrophysics* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1989) [Бакал Дж *Нейтринная астрофизика* (М.: Мир, 1993) с. 104]
50. Михеев С П, Смирнов А Ю *УФН* **153** 3 (1987) [Mikheev S P, Smirnov A Yu *Sov. Phys. Usp.* **30** 759 (1987)]
51. Bilenyk S M, Fabbrichesi M, Petcov S T *Phys. Lett. B* **276** 223 (1992)
52. Aliu E et al. (K2K Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **94** 081802 (2005)
53. Acquafredda R et al. *JINST* **4** P04018 (2009)
54. Pietropaolo F (ICARUS Collab.), in *14th Intern. Workshop on Neutrino Telescopes, Venezia, Italy, 2010* (Ed. M Mezzetto) p. 87
55. Adamson P et al. (MINOS Collab.) *Phys. Rev. D* **77** 072002 (2008)
56. Adamson P et al. (MINOS Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **107** 011802 (2011)
57. Агафонова Н Ю и др. *Изв. РАН Сер. физ.* **75** 456 (2011) [Agafonova N Yu et al. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **75** 427 (2011)]
58. Abe K et al. (Super-Kamiokande Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **97** 171801 (2006)
59. Agafonova N Yu et al. (LVD Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **109** 070801 (2012)
60. Pontecorvo B, Chalk River Report PD-205 (Chalk River: Chalk River Laboratories, 1946)
61. Abdurashitov J N et al. (SAGE Collab.) *Phys. Rev. C* **59** 2246 (1999)
62. Abdurashitov J N et al. *Phys. Rev. C* **73** 045805 (2006)
63. Altmann M et al. (GNO Collab.) *Phys. Lett. B* **490** 16 (2000)
64. Bellini G et al. (Borexino Collab.) *Phys. Lett. B* **687** 299 (2010)
65. Bellini G et al. (Borexino Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **107** 141302 (2011)
66. Hosaka J et al. (Super-Kamiokande Collab.) *Phys. Rev. D* **73** 112001 (2006)
67. Abe K et al. (Super-Kamiokande Collab.) *Phys. Rev. D* **83** 052010 (2011)
68. Aharmim B et al. (SNO Collab.) *Phys. Rev. C* **75** 045502 (2007)
69. Aharmim B et al. (SNO Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **101** 111301 (2008)
70. Aharmim B et al. (SNO Collab.) *Phys. Rev. C* **81** 055504 (2010)
71. Зельдович Я Б, Гусейнов О Х *ДАН СССР* **162** 791 (1965) [Zel'dovich Ya B, Guseinov O Kh *Sov. Phys. Dokl.* **10** 524 (1965)]
72. Имшенник В С, Надёжин Д К *УФН* **156** 561 (1988); Imshennik V S, Nadezhin D K *Sov. Sci. Rev. E Astrophys. Space Phys.* **8** (1) 1 (1989)
73. Дадькин В Л, Зацепин Г Т, Рязжская О Г *УФН* **158** 139 (1989) [Dadykin V L, Zatsepin G T, Ryazhskaya O G *Sov. Phys. Usp.* **32** 459 (1989)]
74. Рязжская О Г *УФН* **176** 1039 (2006) [Ryazhskaya O G *Phys. Usp.* **49** 1017 (2006)]
75. Дадькин В Л, Рязжская О Г *Письма в Астрон. журн.* **35** 427 (2009) [Dadykin V L, Ryazhskaya O G *Astron. Lett.* **35** 384 (2009)]
76. Imshennik V S *Space Sci. Rev.* **74** 325 (1995)
77. Дадькин В Л, Рязжская О Г *Письма в Астрон. журн.* **34** 643 (2008) [Dadykin V L, Ryazhskaya O G *Astron. Lett.* **34** 581 (2008)]
78. Gaisser T K, in *14th Intern. Workshop on Neutrino Telescopes, Venezia, Italy, 2010* (Ed. M Mezzetto) p. 349
79. Вернов С Н *УФН* **14** 120 (1934)
80. Вернов С Н и др. *УФН* **63** 131 (1957)
81. Вернов С Н и др. *УФН* **63** 149 (1957)
82. Вернов С Н, Чудаков А Е *УФН* **70** 585 (1960) [Vernov S N, Chudakov A E *Sov. Phys. Usp.* **3** 230 (1960)]
83. Вернов С Н, Добротин Н А *УФН* **123** 531 (1977) [Vernov S N, Dobrotin N A *Sov. Phys. Usp.* **20** 970 (1977)]
84. Панасюк М И *УФН* **181** 197 (2011) [Panasyuk M I *Phys. Usp.* **54** 190 (2011)]
85. Стожков Ю И, Базилевская Г А *УФН* **181** 218 (2011) [Stozhkov Yu I, Bazilevskaya G A *Phys. Usp.* **54** 210 (2011)]
86. Бережко Е Г, Крымский Г Ф *УФН* **181** 223 (2011) [Berezhko E G, Krymsky G F *Phys. Usp.* **54** 215 (2011)]

PACS numbers: 95.55.Vj, 95.85.Ry, 98.70.Sa
DOI: 10.3367/UFNr.0183.201303i.0323

Космические частицы с энергиями выше 10^{19} эВ: краткий обзор результатов

С.В. Троицкий

1. Введение

Интерес к природе космических лучей сверхвысоких (более 10^{19} эВ) энергий (КЛСВЭ) со стороны исследователей, работающих как в физике элементарных частиц, так и в астрофизике, не ослабевает на протяжении десятилетий. Вопросы, возникавшие в этой области, были связаны с происхождением частиц столь высоких энергий, ни при каких других условиях не зарегистрированных в природе, и с поиском новой физики, которая может проявляться в этом энергетическом диапазоне и определять отклонения экспериментальных результатов от теоретических ожиданий. Как мы увидим ниже, эти две группы вопросов сохраняют актуальность и во многом определяют развитие исследований на стыке физики элементарных частиц и астрофизики и в наши дни.

Изучение физики КЛСВЭ ограничено двумя основными трудностями, связанными со спецификой исследуемых явлений. Во-первых, поток таких космических частиц очень мал (в среднем за год на 1 км^2 попадает одна частица с указанной энергией). Малость потока означает невозможность непосредственной регистрации первичных частиц, взаимодействующих в верхних слоях атмосферы, с помощью летающих детекторов и, как следствие, предопределяет косвенный характер их исследования наземными установками, которые регистрируют широкие атмосферные ливни (ШАЛ), вызванные этими частицами. Более того, даже большие наземные установки, работающие на протяжении многих лет, набирают число событий, пренебрежимо малое по сравнению, например, с числом фотонов астрофизического

С.В. Троицкий. Институт ядерных исследований РАН, Москва, РФ
E-mail: st@inr.ac.ru

происхождения, регистрируемых телескопами в любом другом диапазоне энергий. Во-вторых, взаимодействие частиц с атмосферой происходит при энергиях, которые недоступны лабораторному изучению (для протона с энергией 10^{19} эВ, взаимодействующего с покоящимся нуклоном в атмосфере, энергия в системе центра масс составляет несколько сотен ТэВ), поэтому модели, с помощью которых характер развития атмосферного ливня связывается со свойствами первичной частицы, с неизбежностью включают в себя экстраполяцию свойств взаимодействия в неизученную область энергий (и переданных импульсов).

С точки зрения экспериментальной техники, активно работающие сегодня установки, регистрирующие ШАЛ, подразделяются на наземные решётки (НР) детекторов и флуоресцентные телескопы (ФТ). Наземная решётка детекторов регистрирует частицы в ливне на уровне земли. Детекторы образуют сетку с шагом порядка 1 км, что позволяет определять функцию пространственного распределения плотности частиц в ливне. Флуоресцентный детектор представляет собой телескоп, фиксирующий ультрафиолетовое излучение, вызванное флуоресценцией молекул атмосферного азота, возбуждённых заряженными частицами в ливне. НР регистрирует только двумерный срез ШАЛ, но работает вне зависимости от погоды и времени суток и детектирует (а в принципе и позволяет разделять) различные компоненты ливня (электромагнитную, мюонную, барионную). ФТ видит картину продольного развития ливня, но может регистрировать события только в ясные безлунные ночи, что составляет около 10 % от полного времени работы, и является чувствительным только к электромагнитной компоненте ШАЛ. При этом НР регистрирует в основном периферийную часть ливня, а ФТ — центральный ствол (рис. 1).

В настоящее время в мире работают три эксперимента, которые способны изучать ШАЛ, вызванные частицами с энергиями свыше 10^{19} эВ. Эти эксперименты очень различны, и у каждого из них есть свои сильные и слабые стороны.

Якутская комплексная установка ШАЛ, работающая уже более 40 лет, сейчас имеет эффективную площадь НР пластиковых сцинтилляторов около 10 км², что по современным масштабам совсем немного. Основным до-

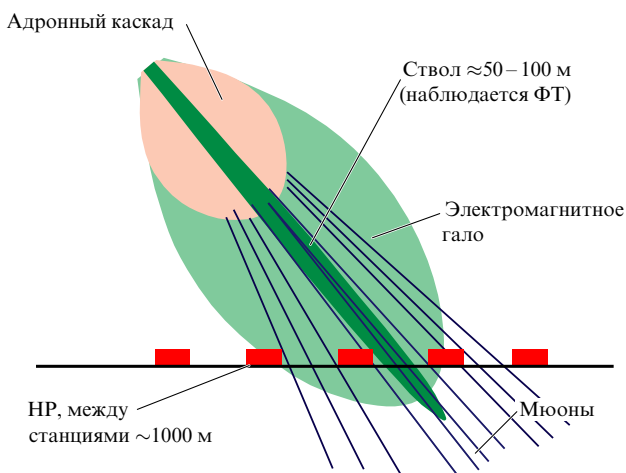


Рис. 1. Схема развития ШАЛ и его регистрации.

стоинством этой установки является возможность одновременной регистрации различных компонент ШАЛ. Это единственная современная установка, предоставляющая данные мюонных детекторов с достаточно большой экспозицией; также данные крайне полезны при анализе состава первичных частиц и проверке моделей взаимодействия частиц при высоких энергиях.

Экспериментальная установка в США (штат Юта) *Telescope Array* (ТА), эксплуатируемая международной коллаборацией, в состав которой входят и российские учёные, включает в себя НР пластиковых сцинтилляторов площадью ≈ 680 км² и три ФТ. Существенным преимуществом данной установки является возможность её работы в гибридном режиме — одновременной регистрации одного и того же ШАЛ с помощью как НР, так и ФТ, причём реконструкция события может проводиться независимо двумя способами (в том числе для ФТ — в стереорежиме).

Крупнейший современный эксперимент в физике КЛСВЭ — международный эксперимент *Обсерватория им. Пьера Оже* (Pierre Auger cosmic ray Observatory — РАО) в Аргентине — имеет НР площадью ≈ 3000 км², что делает РАО бесспорным лидером в экспозиции, и четыре ФТ. РАО также может работать в гибридном режиме, однако независимая от НР реконструкция событий с помощью ФТ не производится, в частности отсутствует стереорекострукция. Можно также сомневаться в удачности выбора водных баков в качестве детекторных станций НР — такие детекторы имеют повышенную чувствительность к мюонной компоненте ШАЛ, которая менее других изучена и хуже моделируется; это иногда приводит к увеличению систематических неопределённостей.

Как и завершившие работу эксперименты прошлых лет, эти установки нередко дают не вполне согласующиеся между собой результаты. Примечательно, что в 2012 г. для обсуждения результатов и устранения противоречий были созданы рабочие группы, включающие в себя представителей всех трёх работающих экспериментов. Первые результаты работы этих групп обсуждались на конференции в ЦЕРНе весной 2012 г.; мы будем во многом опираться на них в разделе 3.

2. Основные наблюдаемые

В этом разделе мы определим основные связанные с КЛСВЭ наблюдаемые, относящиеся как к индивидуальным ШАЛ, так и к совокупности данных. Эта информация понадобится нам для обсуждения экспериментальных результатов в разделе 3. Независимо от способа регистрации ШАЛ, в результате обработки "сырых" данных извлекается информация о нескольких основных характеристиках первичной частицы: её типе, энергии и направлении прихода.

Направление прихода. Наименее подверженная модельной зависимости наблюдаемая величина, реконструируемая по атмосферному ливню, — это направление прихода первичной частицы, которое определяется геометрически. Наземные детекторы восстанавливают направление прихода по времени срабатывания отдельных детекторных станций, на которые фронт ливня, движущийся со скоростью, близкой к скорости света, прибывает неодновременно. ФТ непосредственно фиксирует положение содержащей ствол ливня плоскости,

проходящей через детектор; в стереорежиме положение ствола в пространстве находится как пересечение двух таких плоскостей; при наблюдениях одним телескопом учитывается временная развёртка сигнала. Точность геометрической реконструкции НР зависит не только от точности измерения времени, но и от числа сработавших станций; в случае ФТ определяющим является расстояние от телескопа до оси ливня. На практике точность определения направления прихода уменьшается с возрастом эффективной площади детектора — станции НР располагаются реже, а ФТ просматривают больший объём атмосферы. Лучшее угловое разрешение (направления прихода 68 % событий восстанавливались с точностью не хуже, чем $0,6^\circ$) было достигнуто в эксперименте прошлого поколения HiRes¹ (ФТ в стереорежиме). Для современных экспериментов с большой эффективной площадью эта величина составляет $\sim 1,5^\circ$.

Энергия. Энергия первичной частицы восстанавливается косвенными методами. В случае НР сигнал регистрируется каждым отдельным детектором, а затем пространственное распределение сигнала сравнивается с ожидаемым. Такая процедура определения энергии, естественно, приносит значительную неопределённость, связанную с моделированием ожидаемого сигнала для разных энергий. ФТ наблюдают ствол ливня, частицы в котором несут основную часть энергии; этот метод позволяет оценить полную энергию электронов и позитронов в стволе на основе измерений, в связи с чем метод часто называется калориметрическим. Следует отметить, что остаются значительные источники неопределённости, связанные как с величиной выхода флуоресцентного света, так и с оценкой энергии, которая не содержится в электронах ствола ливня. Во всех случаях дополнительным источником неопределённости (статистической) являются флуктуации в первых взаимодействиях частиц в атмосфере. Энергия конкретной первичной частицы сейчас оценивается со статистической ошибкой $\approx (15-20)\%$ и систематической неопределённостью $\approx 25\%$.

Тип первичной частицы. Вследствие значительных флуктуаций в развитии ШАЛ, вызванных одними и теми же первичными частицами, а также из-за схожести между собой характеристик ливней, вызванных разными частицами, определение типа исходной частицы для отдельно взятого события сегодня, как правило, не представляется возможным. Подходы к решению этой задачи основаны на изучении отдельных компонент ШАЛ (электрон-фотонная, мюонная, адронная, черенковское излучение и т.д.) и детальных характеристик продольного и/или поперечного развития ливня (глубина максимального развития, форма фронта и т.д.). Даже вероятностные оценки, получаемые этими методами, сильно зависят от используемой модели.

Наблюдаемые ансамбли ШАЛ. Три основных характеристики, определяемые для индивидуального события, позволяют проанализировать ансамбль ливней и получить статистическую информацию о свойствах КЛСВЭ: составе первичных частиц, энергетическом спектре и распределении направлений прихода. При анализе последнего ищутся отклонения от изотропного распределения на больших (глобальная анизотропия) или малых (кластеры; совпадения с возможными источниками) угловых

масштабах. Результаты этих исследований обсуждаются в разделе 3.

3. Обзор экспериментальных результатов

3.1. Оценка энергии и спектр

Энергетические спектры КЛСВЭ, измеренные различными экспериментами, приведены на рис. 2а. Определение спектра космических лучей, основанное на абсолютном измерении энергии первичных частиц по вызванным ими атмосферным ливням, а для флуоресцентных детекторов — ещё и на детальном компьютерном моделировании экспозиции, не может быть проведено модельно-независимым образом. С целью устранения произвола, связанного с выбором моделей, и подавления систематических ошибок в работе [1] было предположено, что причина различия спектров, построенных по данным разных экспериментов, состоит в не зависящей от энергии систематической ошибке определения энергии для каждого эксперимента. Это предположение косвенно подтверждается наличием систематической разницы между определёнными с помощью НР и ФТ значениями энергии первичных частиц ШАЛ, которые наблюдались двумя типами детекторов как в РАО, так и в ТА одновременно. Величины относительных систематических сдвигов легко найти, если потребовать, чтобы спектры, измеренные различными экспериментами, совпадали. Для того чтобы определить абсолютную нормировку, требуется дополнительное теоретическое предположение; в работе [1] для калибровки масштаба энергий используется положение теоретически предсказанного провала в спектре, связанного с потерями энергии протонов на рождение электрон-позитронных пар. Совпадение как формы, так и абсолютной нормировки сдвинутых спектров в широком интервале энергий $10^{17,5} \lesssim E \lesssim 10^{19,5}$ эВ является сильным аргументом в пользу такого подхода. Как видно из рис. 2б, при наиболее высоких энергиях согласие несколько ухудшается.

В течение долгого времени интерес к физике КЛСВЭ подогревался предсказанием Грейзена [8], Зацепина и Кузьмина [9] об обрезании спектра космических протонов при энергиях выше $\sim 7 \times 10^{19}$ эВ, соответствующих порогу рождения π -мезонов во взаимодействиях протонов с фотонами реликтового излучения (эффект ГЗК), и одновременно экспериментальным наблюдением ШАЛ, вызванных первичными частицами, реконструированная энергия которых превышала 10^{20} эВ (первое такое событие было зарегистрировано экспериментом Volcano Ranch [10] ещё до открытия реликтового излучения). Как видно из рис. 2, существование таких событий подтверждено всеми экспериментами, однако данные последних лет указывают на наличие завала в спектре [4, 6, 11]. Статистическая значимость завала оценивается обычно из сравнения данных с продолжающимся степенным спектром, который исключается на определённом уровне достоверности. Количественные оценки значимости, очевидно, зависят от модели продолжающегося спектра, поэтому они здесь не приводятся; следует также помнить, что эти результаты не являются доказательством того, что завал связан с обрезанием ГЗК, и не исключают продолжения спектра в виде "ступеньки".

¹ High Resolution Fly's Eye Experiment.

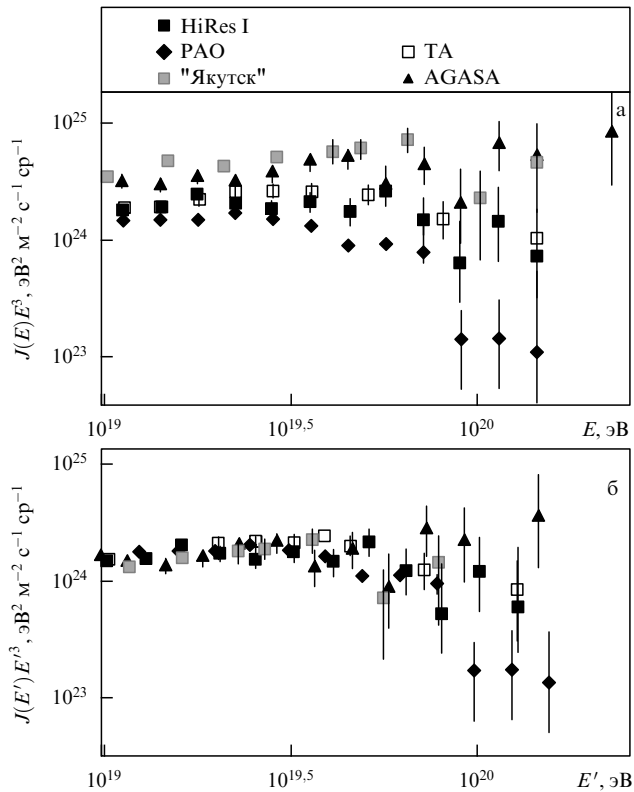


Рис. 2. Спектры КЛСВЭ ($J(E)$ — поток частиц), измеренные экспериментами AGASA (Akeno Giant Air Shower Array) [2], "Якутск" [3], HiRes I [4], PAO [5] и TA [6] до (а) и после (б) сдвига масштаба энергии. Величины [7] сдвигов энергии для указанных экспериментов $E'/E = 0,652, 0,561, 0,911, 1,102, 0,906$ соответственно.

3.2. Состав первичных частиц

Сегодня вопрос о составе первичных частиц КЛСВЭ следует считать открытым. В течение нескольких последних лет на конференциях и в литературе активно обсуждаются противоречивые результаты, полученные в экспериментах HiRes и PAO. В то время как результаты первого из них полностью согласуются с не зависящим от энергии преимущественно протонным составом, измерения второго указывают на постепенное утяжеление первичных ядер с увеличением энергии. В качестве основных наблюдаемых в обоих анализах использовались глубина максимального развития ливня X_{\max} , определяемая с помощью ФТ, и величина её флуктуаций. Кроме того, глубина X_{\max} исследовалась (на меньшей статистике) по данным ФТ установки TA и по наблюдениям черенковского света на установке "Якутск" (в последнем случае оценивались и флуктуации).

Результаты всех экспериментов, расположенных в Северном полушарии (и наблюдающих Северное небо), согласуются с протонным составом, в отличие от результатов PAO (Южное полушарие). Рассогласование с результатами PAO можно было бы объяснить наличием близких источников, приводящим к существенной зависимости состава первичных частиц от направления на небесной сфере. Однако в 2012 г. коллаборация PAO представила (см. [12]) отдельный анализ событий, пришедших из Южной и Северной небесных полусфер (близкая к экватору часть последней наблюдается всеми экспериментами), — никакой систематической разницы не было

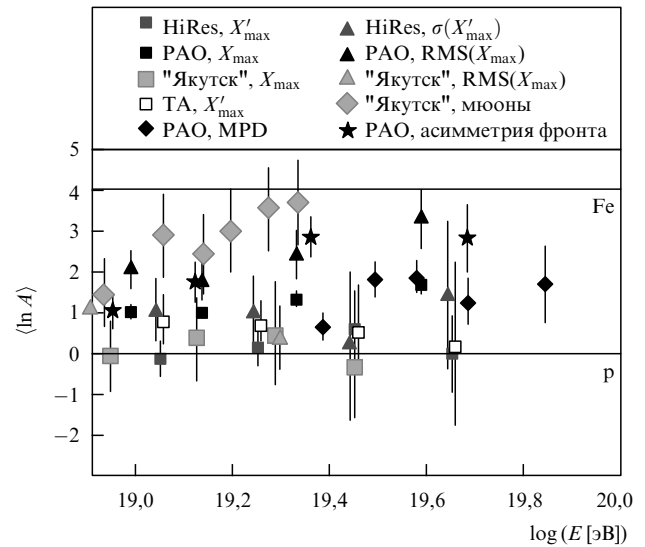


Рис. 3. Результаты анализа состава первичных частиц КЛСВЭ разными методами: глубина развития ливня и её флуктуации по данным HiRes [14], PAO [15], TA [16] и "Якутск" [17]; мюонные данные "Якутска" [18]; восстановление глубины рождения мюонов (Muon Production Depth — MPD) и асимметрия формы фронта по данным HP PAO [19]. (RMS — Root Mean square.)

обнаружено. Северные эксперименты пока не обладают достаточным количеством событий для такого анализа.

В качестве другой возможной причины противоречия в результатах по X_{\max} указывалось методическое различие в обработке данных в экспериментах PAO и "Якутск", с одной стороны, и HiRes и TA — с другой. В то время как X_{\max} индивидуального ливня определена всеми указанными экспериментами примерно одинаково, для изучения ансамбля событий PAO и "Якутск" отбирают (накладывая множество условий и существенно сокращая используемый набор данных) наиболее репрезентативную (с минимальным смещением — minimum-bias) выборку событий, распределение которых по X_{\max} должно совпадать с распределением для всех ШАЛ, в том числе не вошедших в выборку. HiRes и TA, напротив, анализируют весь набор зарегистрированных ШАЛ, но учитывают эффекты селекции при расчёте теоретически ожидаемых средних значений, X'_{\max} , для конкретной выборки. Кроме того, HiRes использовал несколько иную, по сравнению с таковой в PAO и "Якутске", величину, параметризующую флуктуации. Таким образом, непосредственное сравнение результатов установок возможно лишь в терминах окончательного результата — состава первичных ядер, традиционно параметризуемого усреднённым логарифмом их атомной массы $\langle \ln A \rangle$. К сожалению, такой анализ с необходимостью зависит от применяемой модели развития ливня, связывающей $\langle \ln A \rangle$ с наблюдаемыми параметрами.

Результаты такого анализа с использованием как упомянутых, так и ряда других параметров ШАЛ приведены на рис. 3, где в качестве модели высокоэнергетических адронных взаимодействий использовалась QGSJET II² [13] (её выбор определяется наличием опубликованных данных для сравнения с результатами этой модели). По нашему мнению, разброс полученных разными методами

² QGSJET — Quark Gluon String model with JETs.

значений $\langle \ln A \rangle$ указывает на преждевременность выводов о каких-либо серьёзных противоречиях между экспериментами: так, выраженная в терминах $\langle \ln A \rangle$ разница в результатах анализа X_{\max} экспериментами HiRes и PАО не превышает разницы между результатами PАО, полученными из X_{\max} и из флуктуаций X_{\max} . Следует признать, что, по-видимому, вклад систематических ошибок в результаты определения состава первичных частиц пока доминирует над вкладами реальных эффектов.

Завершая обсуждение химического состава, обратим внимание на то, что с астрофизической точки зрения наличие большого количества первичных тяжёлых ядер представляется менее вероятным, чем наличие протонного (в основном) состава, так как требует механизма повышения металличности инжектированного вещества в источниках на несколько порядков величины по сравнению с максимально известной звёздной металличностью. Аргументация, связанная с более эффективным ускорением частиц с большим электрическим зарядом, приводит к требованию резкого (экспериментально не наблюдаемого) скачка как в составе, так и в полном потоке космических частиц при энергиях, соответствующих максимальным энергиям ускоренных протонов.

3.3. Анизотропия направлений прихода

Небольшое количество событий, достаточно плохое угловое разрешение и отклонения заряженных частиц космическими магнитными полями делают на нынешнем этапе невозможной пообъектную идентификацию источников, привычную для классической астрономии. Вместо этого приходится оперировать статистическими методами и искать проявления той или иной модели популяции источников в анизотропном распределении направлений прихода космических лучей для выборки событий в целом. Здесь можно выделить поиски глобальной и мелкомасштабной анизотропии.

Глобальная анизотропия направлений прихода ожидается в случае, когда наблюдаемый поток космических лучей создаётся ограниченным числом относительно близких источников. Такая картина возможна в двух случаях: либо имеется значительный избыток плотности источников вблизи наблюдателя, либо частицы от далёких источников по тем или иным причинам до нас не долетают. Первому случаю соответствует предположение о наличии источников в нашей Галактике. Второй реализуется для астрофизических источников протонов при энергиях, близких к порогу ГЗК; основной вклад в поток космических лучей с такими энергиями должны вносить источники, расположенные внутри так называемой сферы ГЗК с радиусом порядка 100 Мпк. Поскольку материя внутри этой сферы распределена неоднородно, астрофизический сценарий с большим числом источников протонов предполагает анизотропное распределение направлений прихода. Это распределение можно предсказать на основе функции распределения плотности источников, т.е. распределения вещества во Вселенной, и предположений о характере распространения частиц. Поиски проявлений тех или иных источников в *мелкомасштабной анизотропии* сводятся в основном к изучению автокорреляционной функции (кластеринга) или корреляций направлений прихода космических лучей с положениями объектов определённого класса.

Результаты практически всех анализов распределения направлений прихода первичных частиц с энергиями,

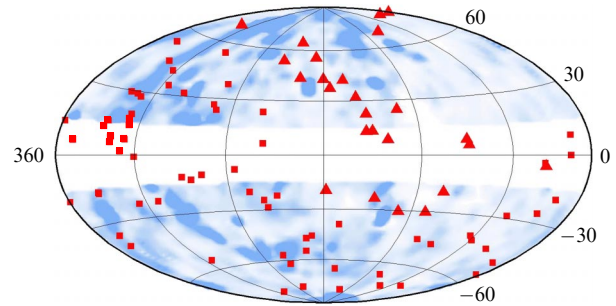


Рис. 4. Ожидаемый поток протонов с $E \geq 5,5 \times 10^{19}$ эВ от внегалактических источников, распределение которых повторяет крупномасштабную структуру Вселенной, с учётом экспозиции PАО и ТА (галактические координаты). Более тёмные области соответствуют большему потоку. Методика вычисления описана в [20]. Относительные экспозиции нормированы на число опубликованных событий. Светлая полоса — зона галактического поглощения, в которой данные о структуре неточны. Направления прихода событий PАО [21] показаны квадратами, а ТА [22] — треугольниками.

превышающими 10^{19} эВ, статистически согласуются с изотропным распределением на неплохом уровне достоверности. В то же время в отдельных случаях имеются указания на отклонения от изотропии, т.е. данные, оставаясь совместными с изотропным распределением, не исключают и некоторых сценариев анизотропии. Так, в Южном полушарии (PАО) глобальное распределение направлений прихода указывает на возможную их корреляцию с крупномасштабной структурой Вселенной, в то время как в данных северных экспериментов такой корреляции не видно (рис. 4); результаты ТА исключают на уровне достоверности 90 % такую корреляцию для событий с энергиями $E > 10^{19}$ эВ (направления прихода частиц с $E > 4 \times 10^{19}$ эВ совместны с обоими сценариями).

Одним из наиболее важных для астрофизики результатов последнего времени является отсутствие статистически значимой кластеризации направлений прихода на небольших масштабах. Поиск кластеров событий позволяет ограничить число их источников в ближайшей Вселенной: в пределе, когда есть всего один источник, направления прихода концентрировались бы в одно пятно около него; напротив, в пределе бесконечного множества источников распределение являлось бы изотропным. Количественный метод, позволяющий ограничить снизу число источников исходя из отсутствия кластеров, был разработан в [23]; несколько усложнённая его версия недавно была применена к результатам PАО [24]. Надёжные результаты, ограничивающие плотность источников, могут быть получены для самых высоких энергий, когда все вносящие вклад в наблюдаемый поток космических частиц источники расположены недалеко (вследствие эффекта ГЗК), а отклонения частиц магнитными полями невелики. Результатом анализа является ограничение $n \geq 10^{-4}$ Мпк $^{-3}$ на концентрацию источников частиц с $E \geq 5,5 \times 10^{19}$ эВ при предположении небольших отклонений. Это ограничение является очень строгим: источники должны быть гораздо более многочисленными, чем предполагается в большинстве моделей. Действительно, простейшие ограничения на физические параметры источника частиц с такими энергиями [25] показывают, что для классических механизмов диффуз-

ного ускорения частиц до приобретения ими обсуждаемых энергий (например, для ускорения в ударных волнах) требуемые условия выполняются только в весьма экзотических и мало распространённых во Вселенной объектах — мощнейших активных галактиках. В то же время редко обсуждаемый механизм непосредственного ускорения частиц в магнитосферах сверхмассивных чёрных дыр [26] позволяет удовлетворить ограничениям на концентрацию и построить модель популяции источников [27].

Автокорреляционная функция для направлений прихода событий с $E > 10^{19}$ эВ полностью совместна с ожидаемой для изотропного распределения [22], однако для более высоких энергий наблюдаются незначительные отклонения, выражающиеся в избытке событий, разделённых угловым масштабом около 15° . В данных РАО этот избыток определяется наличием пятна событий [28, 29] вокруг близкой радиогалактики Cen A, которое, возможно, отвечает и за эффект корреляций с крупномасштабной структурой (Cen A проектируется на более далёкое, но очень многочисленное сверхскопление галактик); в Северном полушарии (ТА) такого очевидного пятна нет. Отметим, что при $E > 10^{20}$ эВ эксперименты РАО и ТА зарегистрировали всего шесть событий, направления прихода двух из которых совпадают в пределах углового разрешения [30].

Одним из наиболее известных результатов сравнения направлений прихода частиц с положениями астрофизических объектов определённого класса является заключение коллаборации Pierre Auger [31] о корреляции направлений прихода частиц с $E > 5,6 \times 10^{19}$ эВ с положениями близких активных галактик, которая была интерпретирована как свидетельство в пользу того, что события с такими энергиями вызываются протонами либо этих галактик, либо других объектов, распределённых во Вселенной сходным образом. Такая гипотеза плохо согласуется с результатами анализа других наблюдаемых (состав первичных частиц, глобальная анизотропия) и с астрофизикой источников. Гипотеза под-

тверждалась анализом данных "Якутска" [32], но не подтверждалась HiRes [33]. Позднее полученные данные РАО [21] указывают на заметно более слабый по сравнению с результатом [31] эффект. Результаты ТА [22] исключают первоначальную [31] оценку величины эффекта и являются совместными как с его отсутствием вообще, так и с оценкой [21].

4. Приложения к физике частиц

Именно в космических лучах были открыты многие элементарные частицы, и сегодня фундаментальная физика частиц и взаимодействий продолжает использовать информацию из физики и астрофизики космических лучей. Основные направления здесь — изучение адронных взаимодействий при энергиях, на порядок превышающих достигнутые на ускорителях; поиск неизвестных эффектов, влияющих на развитие атмосферного ливня; поиски "новой физики" для решения проблем объяснения астрофизических результатов в рамках стандартных сценариев.

4.1. Взаимодействия частиц при очень высоких энергиях

Энергия протон-протонного столкновения на Большом адронном коллайдере (Large Hadron Collider — LHC) на порядок величины меньше энергии (в системе центра масс) первого взаимодействия частицы сверхвысоких энергий в атмосфере. С одной стороны, это приводит к значительной неопределённости в моделях, описывающих ШАЛ (хотя результаты LHC, в том числе специально созданной экспериментальной установки LHCf (LHC forward), сейчас активно используются для улучшения этих моделей, избежать экстраполяции не удаётся). С другой стороны, измерение модельно-независимых характеристик ШАЛ позволяет непосредственно получать количественную информацию о первом взаимодействии. Оба этих аспекта иллюстрируются на рис. 5. Сегодняшний уровень точности как моделей, так и

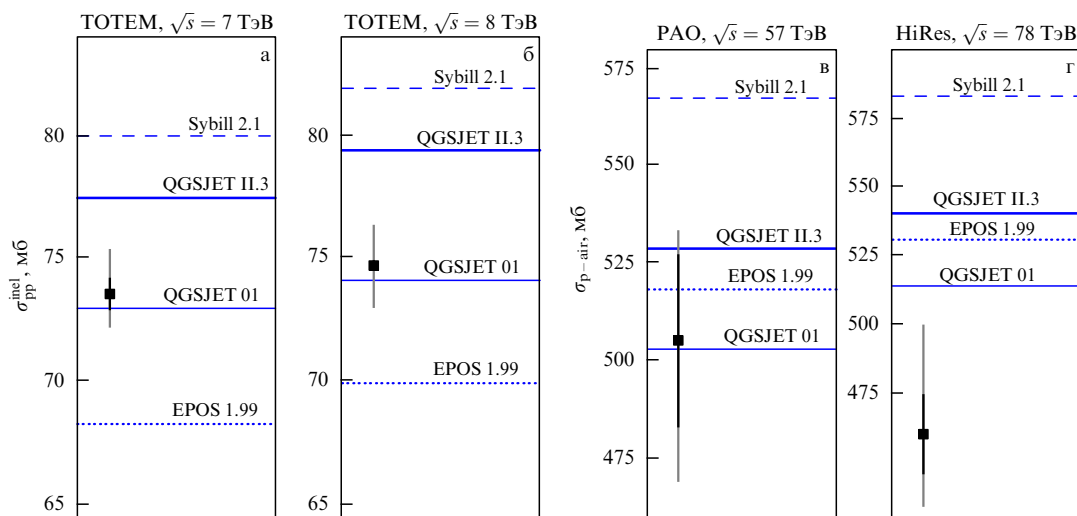


Рис. 5. Сравнение сечений рассеяния, используемых в моделях адронных взаимодействий Sybill 2.1 [34], QGSJET 01 [35], QGSJET II [13] и EPOS 1.99 [36], с экспериментальными результатами. Сечение неупругого pp-рассеяния $\sigma_{pp}^{\text{inel}}$ согласно указанным моделям и по данным эксперимента TOTEM при энергии LHC $\sqrt{s} = 7$ ТэВ [37] (а) и $\sqrt{s} = 8$ ТэВ [38] (б). Сечение рассеяния p-воздух $\sigma_{p\text{-air}}$ согласно указанным моделям и по данным анализа ШАЛ в экспериментах РАО [39] при $\sqrt{s} = 57$ ТэВ (в) и HiRes [40] при $\sqrt{s} = 78$ ТэВ (г). Статистические и систематические ошибки результатов экспериментальных измерений (квадраты) показаны тёмными и светлыми отрезками соответственно.

измерений не позволяет что-либо утверждать о влиянии неизвестных физических эффектов на развитие ШАЛ.

4.2. Поиски "новой физики"

Остановимся теперь на двух (далеко не уникальных, но наиболее, на наш взгляд, интересных сегодня) примерах применения КЛСВЭ для поиска и ограничения моделей "новой физики" — частиц и взаимодействий, существование которых предполагается в теориях, расширяющих Стандартную модель (СМ) физики элементарных частиц и решающих некоторые её проблемы [41].

Нейтральные частицы от лацертид. В 2004 г. при анализе выборки данных с наилучшим угловым разрешением в физике КЛСВЭ (HiRes-стерео [42]) были обнаружены [43] статистически значимые корреляции направлений прихода небольшой доли (около 2 %) космических частиц с энергиями, превышающими 10^{19} эВ, с яркими лацертидами — мощными активными галактиками определённого типа, находящимися на больших расстояниях от Земли. Угловое разрешение установки было значительно меньше ожидаемого отклонения протонов с такими энергиями в магнитном поле Галактики, так что это наблюдение указало на наличие нейтральных частиц сверхвысоких энергий, распространяющихся на космологические расстояния. В последующей работе коллаборации HiRes [44] этот результат был подтверждён с помощью альтернативного метода анализа. Данное явление не находит объяснения в рамках стандартной физики и астрофизики (см., например, обсуждение в работе [45]). Не помогают в этом случае и популярные расширения СМ, например суперсимметрия. Единственное непротиворечивое и доступное экспериментальной проверке объяснение этого эффекта, помогающее решить также ряд других астрофизических проблем, предложено в [46] — это объяснение основано на эффекте аксион-фотонных осцилляций. К сожалению, само наличие корреляций пока не удалось проверить в независимом аналогичном эксперименте: из-за худшего углового разрешения единственной установки (ТА), в которой ФТ работают в стереорежиме, требуется очень большое число событий, пока ещё не набранное. Отсутствие эффекта в данных НР РАО [47] согласуется с предсказаниями аксион-фотонной гипотезы: водные баки РАО практически нечувствительны к маломюонным ШАЛ, вызванным первичными фотонами.

Сверхтяжёлая тёмная материя. Один из экспериментальных результатов, требующих для своего объяснения расширения СМ, состоит в наличии во Вселенной большого количества невидимого вещества — так называемой тёмной материи. В одном классе моделей предполагается, что это вещество состоит из метастабильных (время жизни τ_X порядка времени жизни Вселенной) сверхтяжёлых (масса $M_X > 10^{20}$ эВ) частиц X, среди продуктов распада которых могут быть первичные частицы КЛСВЭ. Процесс распада частиц X может быть описан достаточно модельно-независимым образом, так как ключевую роль в его физике играют довольно хорошо изученные процессы адронизации. Предсказания этого сценария включают в себя очень жёсткий спектр при самых высоких энергиях, большую долю первичных фотонов и галактическую анизотропию распределения направлений прихода. Наиболее строгие ограничения сегодня связаны с ограничениями на поток фотонов, однако и они оставляют [48] разрешённую большую область значений пара-

метров частиц X. Данная модель привлекает особый интерес в связи с необнаружением других кандидатов на роль частицы тёмной материи в ЛНС.

5. Заключение

На протяжении нескольких десятилетий физика КЛСВЭ остаётся одной из самых интересных областей на стыке астрофизики и физики элементарных частиц. Несмотря на серьёзный прогресс в эксперименте, сегодня мы мало что можем сказать о происхождении частиц с энергиями выше 10^{19} эВ, и лишь немногие модели ускорения частиц в астрофизических источниках могут одновременно удовлетворить требованиям, налагаемым на физические условия в этих космических ускорителях, и полученному недавно исходя из отсутствия кластеров направлений прихода строгому ограничению снизу на плотность источников. В результатах исследования химического состава первичных частиц с такими энергиями систематические ошибки, по-видимому, доминируют над вкладами от физических эффектов. По-прежнему не выяснена физическая причина систематической разницы в определении энергии первичной частицы разными методами. Пристального внимания заслуживают некоторые указания на возможные проявления "новой физики" в космических лучах.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 10-02-01406, 11-02-01528 и 12-02-01203), Президента РФ (грант НШ-5590.2012.2), Министерства образования и науки РФ (соглашения 8142 и 14.В37.21.0457) и фонда "Династия".

Список литературы

1. Berezhinsky V, Gazizov A, Grigorieva S *Phys. Rev. D* **74** 043005 (2006)
2. Takeda M et al. *Astropart. Phys.* **19** 447 (2003)
3. Egorova V P et al. *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **136** 3 (2004)
4. Abbasi R U et al. (High Resolution Fly's Eye Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **100** 101101 (2008)
5. Salamida F (for the Pierre Auger Collab.), in *Proc. of the 32nd Intern. Cosmic Ray Conf., ICRC2011, 11–18 August, 2011, Beijing, China* Vol. 2 (2011) p. 145; arXiv:1107.4809, p. 1
6. Abu-Zayyad T et al. (TA Collab.), arXiv:1205.5067
7. Tsunesada Y et al. (Spectrum Working Group), UHECR-2012 (Geneva: CERN, 2012)
8. Greisen K *Phys. Rev. Lett.* **16** 748 (1966)
9. Зацепин Г Т, Кузьмин В А *Письма ЖЭТФ* **4** 114 (1966) [Zatsepin G T, Kuz'min V A *JETP Lett.* **4** 78 (1966)]
10. Linsley J *Phys. Rev. Lett.* **10** 146 (1963)
11. Abraham J et al. (Pierre Auger Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **101** 061101 (2008)
12. Bellido H et al. (Composition Working Group), UHECR-2012 (Geneva: CERN, 2012)
13. Ostapchenko S *Phys. Rev. D* **74** 014026 (2006)
14. Abbasi R U et al. (High Resolution Fly's Eye Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **104** 161101 (2010)
15. Facal P et al. (Pierre Auger Collab.), in *Proc. of the 32nd Intern. Cosmic Ray Conf., ICRC2011, 11–18 August, 2011, Beijing, China* (2011); Abreu P et al. (Pierre Auger Collab.), arXiv:1107.4804
16. Jui C C H (for the Telescope Array Collab.), arXiv:1110.0133
17. Berezhko E G, Knurenko S P, Ksenofontov L T *Astropart. Phys.* **36** 31 (2012)
18. Dedenko L G et al. *J. Phys. G Nucl. Part. Phys.* **39** 095202 (2012)
19. Garcia-Pinto D et al. (Pierre Auger Collab.), in *Proc. of the 32nd Intern. Cosmic Ray Conf., ICRC2011, 11–18 August, 2011, Beijing, China* (2011); Abreu P et al. (Pierre Auger Collab.), arXiv:1107.4804
20. Kalashev O E et al. *JCAP* (03) 003 (2008)

21. Abreu P et al. (Pierre Auger Collab.) *Astropart. Phys.* **34** 314 (2010)
22. Abu-Zayyad T et al. (TA Collab.) *Astrophys. J.* **757** 26 (2012)
23. Dubovsky S L, Tinyakov P G, Tkachev I I *Phys. Rev. Lett.* **85** 1154 (2000)
24. De Domenico M et al. (Pierre Auger Collab.), in *Proc. of the 32nd Intern. Cosmic Ray Conf., ICRC2011, 11–18 August, 2011, Beijing, China* Vol. 2 (2011) p. 113; Abreu P et al. (Pierre Auger Collab.), arXiv:1107.4809
25. Птицына К В, Троицкий С В *УФН* **180** 723 (2010) [Ptitsyna K V, Troitsky S V *Phys. Usp.* **53** 691 (2010)]
26. Neronov A Yu, Semikoz D V, Tkachev I I *New J. Phys.* **11** 065015 (2009)
27. Kalashev O E, Ptitsyna K V, Troitsky S V *Phys. Rev. D* **86** 063005 (2012)
28. Gorbunov D et al. *Письма ЖЭТФ* **87** 547 (2008) [*JETP Lett.* **87** 461 (2008)]
29. Gorbunov D S et al., arXiv:0804.1088
30. Troitsky S V *Письма ЖЭТФ* **96** 14 (2012) [Troitsky S V *JETP Lett.* **96** 13 (2012)]
31. Abraham J et al. (Pierre Auger Collab.) *Science* **318** 938 (2007)
32. Иванов А А *Письма ЖЭТФ* **87** 215 (2008) [Ivanov A A *JETP Lett.* **87** 185 (2008)]
33. Abbasi R U et al. (High Resolution Fly's Eye Collab.) *Astropart. Phys.* **30** 175 (2008)
34. Ahn E-J et al. *Phys. Rev. D* **80** 094003 (2009)
35. Калмыков Н Н, Остапченко С С *ЯФ* **56** (3) 105 (1993) [Kalmykov N N, Ostapchenko S S *Phys. Atom. Nucl.* **56** 346 (1993)]
36. Werner K, Liu F-M, Pierog T *Phys. Rev. C* **74** 044902 (2006)
37. Antchev G et al. (TOTEM Collab.) *Europhys. Lett.* **96** 21002 (2011)
38. Antchev G et al. (TOTEM Collab.), Preprint CERN-PH-EP-2012-354 (Geneva: CERN, 2012)
39. Abreu P et al. (Pierre Auger Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **109** 062002 (2012)
40. Belov K et al. (High Resolution Fly's Eye (HiRes) Collab.) *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **151** 197 (2006)
41. Троицкий С В *УФН* **182** 77 (2012) [Troitsky S V *Phys. Usp.* **55** 72 (2012)]
42. Abbasi R U et al. (HiRes Collab.) *Astrophys. J.* **610** L73 (2004)
43. Gorbunov D S et al. *Письма ЖЭТФ* **80** 167 (2004) [*JETP Lett.* **80** 145 (2004)]
44. Abbasi R U et al. (HiRes Collab.) *Astrophys. J.* **636** 680 (2006)
45. Tinyakov P G, Tkachev I I *ЖЭТФ* **133** 556 (2008) [*JETP* **106** 481 (2008)]
46. Fairbairn M, Rashba T, Troitsky S *Phys. Rev. D* **84** 125019 (2011)
47. Harari D (for the Pierre Auger Collab.), arXiv:0706.1715
48. Kalashev O E, Rubtsov G I, Troitsky S V *Phys. Rev. D* **80** 103006 (2009)