Современное состояние исследований в области космических лучей сверхвысоких энергий. Краткий обзор

М. Ю. Зотов^{1,*a*}, О. Е. Калашев², М. С. Пширков^{2,3,*b*}

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ). Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2. ² Институт ядерных исследований РАН.

Россия, 117312, Москва, В-312, просп. 60-летия Октября, д. 7а.

³Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга (ГАИШ МГУ).

Россия, 119991, Москва, Университетский пр-т, д. 13.

E-mail: ^a zotov@eas.sinp.msu.ru, ^b pshirkov@sai.msu.ru

Статья поступила 24.06.2016, подписана в печать 13.07.2016.

Одной из наиболее интригующих нерешенных проблем современной астрофизики является происхождение и природа космических лучей сверхвысоких энергий (КЛ СВЭ) ($E > 10^{18}$ эВ). Настоящий обзор посвящен современному состоянию исследований в данной области. Описываются современные крупные эксперименты Обсерватории Пьера Оже и Telescope Array; первый в мире космический детектор ТУС, а также новые проекты, прежде всего орбитальные телескопы КЛПВЭ и JEM-EUSO. В обзоре освещаются новейшие данные о массовом составе и энергетическом спектре космических лучей, обсуждаются вопросы взаимосвязи между КЛ с одной стороны и нейтрино и фотонами СВЭ с другой, приводятся последние результаты по их поиску. Также описано текущее состояние исследований анизотропии направлений прихода КЛ — области, критически важной для поиска источников КЛ самых высоких энергий.

Ключевые слова: космические лучи сверхвысоких энергий, обзор, энергетический спектр, массовый состав, анизотропия, эксперименты.

УДК: 524.1-352, 524.1-52, 524.786, 539.1.074.6. РАСS: 95.55.Vj, 95.85.Ry, 95.85.Pw, 96.50.sb, 96.50.sd.

Введение

Пятьдесят пять лет назад была впервые зарегистрирована космическая частица с энергией порядка 55 ЭэВ (1 ЭэВ = 10^{18} эВ) (вернее, порожденный ей так называемый широкий атмосферный ливень) [1]. Два года спустя было зарегистрировано событие с еще большей энергией — порядка 100 ЭэВ [2]. С тех пор в изучение космических лучей сверхвысоких энергий (КЛ СВЭ, $E\gtrsim 1$ ЭэВ) были вложены огромные ресурсы как в экспериментальном, так и в теоретическом планах, однако их природа и происхождение до сих пор остаются одной из важнейших нерешенных проблем современной астрофизики. В работе дан краткий обзор экспериментов в области КЛ СВЭ, и наиболее важных результатов, полученных в последнее время по энергетическому спектру, массовому составу, анизотропии КЛ, а также результатам поисков событий от нейтрино и фотонов СВЭ. Кроме этого, рассказано о перспективных экспериментах, разрабатываемых в настоящее время. Основное внимание уделено результатам, относящимся к области так называемых предельно высоких энергий $\gtrsim 50$ ЭэВ, которые далеко выходят за границы возможностей наземных ускорителей элементарных частиц.

Отдельной большой темой, не затронутой в настоящем обзоре, являются механизмы ускорения КЛ сверхвысоких энергий и их возможные источники (активные ядра галактик, гамма-всплески, ударные волны в крупномасштабной структуре Вселенной, быстровращающиеся магнетары, распад частиц сверхтяжелой материи и т.д.). Для краткого введения в тематику этих исследований рекомендуем заинтересованному читателю недавние обзоры [3, 4].

1. Экспериментальные установки

На сегодня крупнейшей в мире установкой по регистрации КЛ СВЭ является Обсерватория Пьера Оже (Auger), расположенная в западной части Аргентины. В ней используется гибридная техника регистрации КЛ. Обсерватория состоит из 1660 черенковских детекторов, расположенных на расстоянии 1.5 км друг от друга на площади более 3000 км², и 24 флуоресцентных телескопов, объединенных в 4 станции, находящиеся на границах установки. Черенковские детекторы представляют собой водные баки объемом 12 м³, оборудованные тремя фотоэлектронными умножителями. В состав обсерватории входит также группа черенковских детекторов, расположенных на сетке с шагом 750 м, три флуоресцентных телескопа, просматривающих атмосферу над установкой на более высоких углах, чем основная группа телескопов, и некоторые другие приборы [5]. Эксперимент начал сбор данных в 2004 г. За 10 лет наблюдений полная экспозиция превысила 50000 км² ср год [6]. В составе коллаборации Оже работают более 500 исследователей из 16 стран. Недавно были опубликованы планы дальнейшего совершенствования установки, заключающиеся прежде всего в добавлении на крышу каждого бака дополнительного сцинтилляционного детектора площадью 4 м². Эти дополнительные детекторы позволят лучше различать электромагнитные и мюонные компоненты ШАЛ, что необходимо для изучения состава КЛ СВЭ [7].

Вторым по размерам экспериментом, работающим в области КЛ СВЭ, является Telescope Array (TA), расположенный в штате Юта, США. Аналогично Оже ТА также использует как поверхностные детекторы, так и флуоресцентные телескопы, но в качестве поверхностных детекторов используются двухслойные сцинтилляторы площадью 3 м². В состав установки в настоящее время входит 507 детекторов, расположенных на квадратной сетке с шагом 1.2 км, покрывающей площадь примерно 680 км², т.е. четверть площади Оже. По углам установки размещены три станции, состоящие из 38 флуоресцентных телескопов [8]. Эксперимент работает с марта 2008 г. и обладает чувствительностью к КЛ СВЭ с энергией более 3 ЭэВ. После 7 лет эксплуатации полная экспозиция эксперимента составила 8600 км^2 ср год [9]. Планируется, что в ближайшие годы к установке будет добавлено 500 детекторов (с шагом 2.08 км), после чего ее площадь достигнет 3000 км² и, таким образом, сравняется с площадью Оже [10]. Также в состав установки входит TALE — Telescope Array Low Energy extension — «расширение» с более плотным заполнением поверхностными сцинтилляционными детекторами и большими углами возвышения зеркал флуоресцентных телескопов. ТАLЕ обеспечивает чувствительность к КЛ, начиная от энергий $\sim 3 \cdot 10^{15}$ эВ.

В Российской Федерации с начала 1970-х гг. работает Якутская комплексная установка ШАЛ имени Д. Д. Красильникова. Только на Якутской установке реализовано одновременное измерение трех главных компонент широких атмосферных ливней (ШАЛ): потоков электронов, мюонов и черенковского излучения [11, 12]. В настоящее время эффективная площадь установки составляет 12 км².

Отметим также баллонный эксперимент ANITA (Antarctic Impulsive Transient Antenna), целью которого является регистрация радиоизлучения, порождаемого при прохождении нейтрино СВЭ через лед (так называемый эффект Аскаряна [13]) [14]. К настоящему времени ANITA совершила три полета над Антарктидой.

Эффект Аскаряна также лежит в основе методики регистрации космических лучей и нейтрино предельно высоких энергий, заложенной в концепции эксперимента ЛОРД (Лунный орбитальный радиодетектор) [15]. В данном случае суть метода заключается в том, что детектор, находящийся на окололунной орбите, будет регистрировать радиоизлучение, генерируемое каскадом, порожденным высокоэнергичной частицей в реголите Луны. Основным элементом детектора будут две конические логопериодические антенны, одна из которых будет обеспечивать прием сигнала с левой, а другая с правой круговой поляризацией. Согласно расчетам, при энергиях более 500 ЭэВ экспозиция эксперимента будет в несколько раз выше, чем у Оже. Запуск детектора, входящего в состав научной аппаратуры космического аппарата «Луна-26» («Луна-Ресурс OA»), запланирован на 2020 г.

Наконец, 28 апреля 2016 г. с космодрома Восточный на околоземную орбиту в составе научной аппаратуры спутника «Ломоносов» был запущен первый в мире орбитальный детектор КЛ предельно высоких энергий ТУС. Детектор построен по принципу телескопа-рефрактора. Его основными элементами являются зеркало-концентратор площадью 2 м^2 и фокальным расстоянием 1.5 м, а также фотодетектор, состоящий из 256 пикселей [16]. Поле зрения составляет $\pm 4.5^{\circ}$. При высоте орбиты около 500 км это соответствует площади порядка 6400 км² на поверхности Земли. Угловое разрешение равняется 10 мрад, или 5 км на поверхности. Задача прибора — регистрация в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне фотонов флуоресцентного и черенковского излучений, которые возникают при развитии в атмосфере широкого атмосферного ливня, и их отражении от поверхности Земли. Ожидается, что ТУС сможет таким образом регистрировать КЛ с энергией $\gtrsim 100$ ЭэВ. Кроме этого, ТУС способен детектировать более медленные процессы, в первую очередь так называемые транзиентные атмосферные явления, а также может собрать большой объем информации о величине и вариациях УФ-фона ночной атмосферы, что имеет большое значение для разрабатываемых орбитальных детекторов следующего поколения.

2. Энергетический спектр

Наиболее важной характеристикой потока космических лучей является их энергетический спектр. Вскоре после первой регистрации КЛ с энергией более 50 ЭэВ Грейзен [17] и независимо Зацепин и Кузьмин [18] показали, что при таких энергиях поток протонов должен значительно подавляться в результате взаимодействия с фотонами реликтового микроволнового излучения. Этот эффект, предсказанный теоретически, получил название «обрезания ГЗК» (GZK cut-off). Ситуация с обрезанием ГЗК на протяжении многих лет оставалась неясной, поскольку разные эксперименты давали противоречащие друг другу результаты. Загадка разрешилась лишь в 2007-2008 гг., когда обрезание потока КЛ при энергиях ~ 60 ЭэВ было зарегистрировано экспериментом High Resolution Fly's Eye (HiRes) предшественником ТА — на уровне статистической значимости более 5σ [19, 20]. Вскоре это открытие



Рис. 1. Слева: комбинированный энергетический спектр КЛ по данным коллаборации Оже [6]. Над экспериментальными точками указано число зарегистрированных событий. Справа: энергетический спектр, измеренный ТА с использованием четырех различных методик [23]

было подтверждено коллаборацией Оже [21] и позже — ТА [22].

За время, прошедшее с момента этого открытия, спектр КЛ СВЭ был измерен с беспрецедентной статистикой и точностью. Последние результаты, опубликованные коллаборациями Оже и ТА, показаны на рис. 1 [6, 23]. Из рисунка хорошо видно, что спектры, полученные в обоих экспериментах, аналогичны друг другу при энергиях выше lg(E/эB) = 17.5. Оба спектра демонстрируют так называемую «лодыжку» (ankle) в районе 5 ЭэВ и резкое укручение спектра (обрезание) при энергиях, предсказанных Грейзеном, Зацепиным и Кузьминым.

Совместная рабочая группа коллабораций Оже, ТА и Якутской установки пришла к выводу, что после определенного масштабирования по энергии спектры, полученные Оже и ТА, согласуются друг с другом по нормировке и форме в пределах систематических неопределенностей [24]. Тем не менее, наблюдается заметное различие в области обрезания ГЗК: в случае Оже укручение спектра начинается при энергии ~ 30 ЭэВ, а в случае ТА — при 60 ЭэВ; при этом спектр Оже становится круче, чем спектр ТА. Это различие в спектрах, а также некоторые результаты, относящиеся с химическому составу КЛ СВЭ (см. ниже), не позволяют в настоящее время сделать заключение о том, является ли наблюдаемое поведение спектра следствием эффекта ГЗК, достижением максимально возможной энергии ускорения в источниках или комбинацией обоих факторов.

В связи с этим необходимо отметить, что абсолютные энергии КЛ калибруются по результатам флуоресцентных наблюдений, для которых можно связать энергию, выделяющуюся в виде ультрафиолетового излучения с полной энергией ШАЛ и тем самым с энергией первичной частицы. В настоящее время существует систематическая разница в 20–30% между масштабами энергий сцинтилляционных и флуоресцентных детекторов, которая пока не получила удовлетворительного объяснения и учитывается калибровкой на флуоресцентный масштаб. Возможно, что в дальнейшем значительный прогресс будет достигнут с помощью альтернативных методов калибровки — по черенковскому излучению [25] и радиосигналам от ШАЛ [26, 27].

3. Состав КЛ СВЭ

Еще одной характеристикой космических лучей, принципиально важной для идентификации их источников, является химический (массовый) состав. Выводы о составе КЛ делаются преимущественно на основании наблюдения глубины максимума ШАЛ X_{max} , измеряемой в единицах г/см², а также компьютерного моделирования ШАЛ, порождаемых различными первичными частицами. Считается, что среднее значение X_{max} зависит от энергии E и массового числа A следующим образом:

$$\langle X_{\max} \rangle = a(\ln E - \langle \ln A \rangle) + b,$$

где *а* и *b* — некоторые константы. Используя данные, полученные с помощью флуоресцентных детекторов в 2004–2012 гг., коллаборация Оже проделала детальный анализ распределения X_{max} [28, 29]. Экспериментальная зависимость средних значений и вариации распределений X_{max} была сопоставлена с результатами моделирования, выполненного с применением целого ряда моделей адронных взаимодействий — EPOS-LHC [30], QGSJet II-4 [31] и Sybill 2.1 [32]. Был сделан вывод о том, что поток КЛ СВЭ в области энергий 2 ЭэВ образован преимущественно легкими ядрами, но доля тяжелых ядер возрастает вплоть до 40 ЭэВ [29].

Коллаборация ТА также проводит интенсивное изучение массового состава КЛ, учитывая данные о распределении X_{max} . Процедуры реконструкции используют результаты, полученные одновременно



Рис. 2. Экспериментальная зависимость X_{max} от энергии в сравнении с результатами компьютерного моделирования для протонов (красный) и ядер железа (синий). Слева: Оже [86], справа: Telescope Array [87]

любыми двумя флуоресцентными детекторами (ФД) либо поверхностными детекторами и одним из ФД (гибридный режим).

Последние опубликованные результаты, полученные в гибридном режиме, были основаны на данных, накопленных за 5 лет наблюдений с помощью поверхностных детекторов и станции Middle Drum, которая оснащена 14 модернизированными телескопами эксперимента HiRes. Анализ был во многом аналогичен проделанному ранее эксперименту Оже. Это было сделано с целью упростить сравнение результатов двух экспериментов. Средние значения и степень удлинения (elongation rate) X_{max} , полученные ТА, продемонстрировали хорошее согласие с результатами Оже, однако данные ТА оказались несовместимы с чисто железным составом во всем изученном диапазоне энергий [33]. Последние результаты, опубликованные обеими коллаборациями, показаны на рис. 2. Так как для определения состава необходимо использование результатов флуоресцентных телескопов с их сравнительно низкой долей времени эффективной работы (~10%), то изучение состава на энергиях выше 4 · 10¹⁹ эВ пока практически невозможно из-за отсутствия достаточной статистики. Расширение возможностей поверхностных детекторов и более полное использование различных наблюдаемых от них в будущем позволит изучить состав и на более высоких энергиях в окрестности «обрезания ГЗК».

При сравнении результатов Оже и ТА необходимо иметь в виду, что измерение массового состава первичных КЛ является одной из наиболее сложных задач в области сверхвысоких энергий, поскольку оно основано на данных моделей адронных взаимодействий далеко за пределами энергий, достижимых на ускорителях типа БАК, что приводит к необходимости экстраполяции примерно на два порядка. Важно также, что Оже и ТА применяют отличные друг от друга методики отбора и анализа данных. А именно значения $\langle X_{max} \rangle$, опубликованные коллаборацией ТА, были получены на основе данных о распределении $X_{\rm max}$, которые содержали некоторые детекторные эффекты. Интерпретация таких данных производится на основе сравнения с результатами моделирования, которое учитывает особенности работы конкретного детектора, в частности его разрешение и эффективность регистрации. В свою очередь анализ, проделанный коллаборацией Оже, был основан на геометрии ШАЛ, что позволило получить практически несмещенное распределение $X_{\rm max}$, которое учитывало остаточные погрешности, связанные с эффективностью регистрации, разрешением и реконструкцией [34, 35].

Совместная рабочая группа коллабораций ТА и Оже проделала специальный анализ зависимости $\langle X_{\max} \rangle$ от энергии на основе данных обоих экспериментов. После учета различий в характеристиках двух установок и методиках анализа данных был сделан вывод о том, что в пределах



Рис. 3. Зависимость средних значений $X_{\rm max}$ по данным станции Middle Drum эксперимента TA (синие квадраты) и по данным Оже, учитывающим эффективность работы Middle Drum (красные круги). Для наглядности экспериментальные точки несколько сдвинуты по оси абсцисс. Цветными полосами показаны систематические неопределенности значений $X_{\rm max}$ [35]

систематических погрешностей (неопределенностей) результаты находятся в хорошем согласии между собой (рис. 3). Тем не менее продолжается более детальный анализ.

4. Анизотропия направлений прихода

Одним из важнейших элементов в поиске источников КЛ СВЭ является анализ анизотропии их направлений прихода. Он также является косвенным тестом массового состава КЛ, поскольку ожидается, что протоны и легкие ядра предельно высоких энергий будут лишь незначительно отклоняться внегалактическими магнитными полями в процессе распространения от источников.

Один из традиционных подходов в этой области — изучение крупномасштабной анизотропии. Коллаборация Оже недавно представила результаты гармонического анализа распределения направлений прихода КЛ с энергией выше 4 ЭэВ и зенитными углами до 80° по склонению и прямому восхождению (рис. 4) [36].

Наибольшее отклонение от изотропного потока было найдено для событий с энергией E > 8 ЭэВ. Амплитуда первой гармоники по прямому восхождению составила $(4.4 \pm 1.0) \cdot 10^{-2}$. Вероятность такого отклонения составляет $6.4 \cdot 10^{-5}$. Было показано, что в предположении, что единственный существенный вклад в анизотропию дает дипольная компонента, поток может быть описан диполем с амплитудой 0.073 ± 0.015 в направлении (α, δ) = (95° ± 13°, $-39° \pm 13°$). Это подтвердило результат, полученный ранее для событий с зенитными углами до 60° [37]. Исследование было недавно проведено с новыми данными, и основные выводы остались неизменными [38].

Коллаборация ТА также осуществила анализ крупномасштабной анизотропии КЛ СВЭ, но методика была другой [39]. Вследствие эффекта ГЗК распространение КЛ самых высоких энергий ограничено расстояниями ~ 100 Мпк — на этих масштабах Вселенная еще в значительной степени неоднородна. В подавляющем большинстве моделей возникновения КЛ таких энергий следует ожидать корреляции между направлениями их прихода и распределением галактик в этом объеме, которое, в свою очередь, хорошо известно из наблюдений. В предположении чисто протонного состава КЛ было найдено, что распределение событий с энергией более 10 ЭэВ и более 40 ЭэВ согласуется с гипотезой об изотропности и не следует крупномасштабному распределению материи на углах «размывания» направлений прихода менее 20° и менее 10° соответственно. В отличие от этого, для событий с энергией выше 57 ЭэВ оказалось, что их распределение согласуется с распределением материи и не согласуется с гипотезой изотропности на уровне значимости ~ 3σ .

Важно отметить, что изучение крупномасштабной анизотропии направлений прихода КЛ представляет собой нетривиальную задачу, поскольку корректное определение полного набора мультипольных коэффициентов требует знания потока КЛ по всей небесной сфере, однако существующие наземные установки не в состоянии это обеспечить. По этой причине особый интерес представляет исследование анизотропии КЛ СВЭ, выполненное совместно коллаборациями ТА и Оже [40, 41]. Для взаимной калибровки потоков использовались данные, полученные в полосе по склонению, доступной наблюдению обоими экспериментами. Для анализа было отобрано 2560 событий с зенитными углами до 55° и энергией выше 10 ЭэВ, зарегистрированных за 6 лет работы ТА, и 16835 событий с зенитными углами до 80° и энергией более 8.8 ЭэВ, набранных за 10 лет работы Оже. В результате не было найдено никаких статистически значимых отклонений от изотропного распределения потока КЛ, но удалось получить верхние оценки для амплитуд дипольного и квадрупольного моментов как функций направления на небесной сфере. Величина амплитуды диполя составила $(6.5 \pm 1.9)\%$ с вероятностью $5 \cdot 10^{-3}$ в направлении (α, δ) = ($93^{\circ} \pm 24^{\circ}$, $-46^{\circ} \pm 18^{\circ}$) (рис. 5). Интересно, что, в отличие от более ранней работы [40], угловая спектральная плотность, полученная в [41], демонстрирует ясно выделяющийся дипольный момент. Величина амплитуды квадрупольного момента оказалась в пределах ожидаемых флуктуаций изотропного потока.

Значительный интерес вызывают также исследования анизотропии на меньших угловых масштабах, поскольку они открывают дорогу для поиска



Рис. 4. Распределение потока КЛ с энергией 4 < E < 8 ЭэВ (слева) и E > 8 ЭэВ (справа), сглаженное по областям радиусом 45°, в единицах км⁻² ср⁻¹ год⁻¹. Использованы экваториальные координаты [36]



Рис. 5. Слева: карта потока КЛ с энергией более 10 ЭэВ в единицах км⁻² ср⁻¹ год⁻¹, полученная экспериментами Оже и ТА и сглаженная по областям с угловым радиусом 60°. Использованы экваториальные координаты. Белой звездочкой показано расположение найденного диполя. Справа: совместная угловая спектральная плотность по данным Оже и ТА [41]

корреляции с распределением материи в локальной части Вселенной, а также с возможными источниками КЛ самых высоких энергий. В частности, в конце 2000-х гг. большое внимание привлек результат, полученный коллаборацией Оже, о наблюдении корреляции между направлениями прихода КЛ с энергиями более 55 ЭэВ и расположением активных ядер галактик (АЯГ) на удалении до 75 Мпк, среди них с радиогалактикой Centaurus A (Cen A), находящейся на расстоянии менее 4 Мпк от Солнечной системы [42–44]. Недавно были представлены результаты целого ряда тестов, направленных на поиск анизотропии КЛ с энергией более 40 ЭэВ, среди которых 231 событие имело энергию ≥ 52 ЭэВ [45]. Ни один из тестов не выявил статистически значимого отклонения от изотропного распределения,



Рис. 6. Слева: направления прихода КЛ с энергией более 57 ЭэВ, зарегистрированных экспериментом ТА (в экваториальных координатах). Синие точки — события, зарегистрированные за первые 5 лет наблюдений, красные — за последующие два года. Справа: карта статистической значимости отклонений от изотропного потока по данным за 7 лет, сглаженная по кругам радиусом 20° [50]

но было показано, что наблюдается некоторый избыток событий с энергией ≥58 ЭэВ в направлении на Сеп А и АЯГ из каталога Swift-BAT, удаленных на расстояния до 130 Мпк и имеющих светимость более 1044 эрг/с. В обоих случаях вероятность случайного появления такого избытка составила 1.3-1.4%. С другой стороны, аналогичное исследование, предпринятое ТА на основе данных о КЛ с энергией более 40 ЭэВ, зарегистрированных поверхностными детекторами за первые 40 мес работы установки, не выявило никакой статистически значимой корреляции с АЯГ из нескольких каталогов [46]. Поиски точечных источников на энергиях выше 10¹⁷ эВ, выполненные экспериментами Оже и ТА, также не выявили статистически значимых кандидатов [47, 48].

Несомненно, наиболее интригующим результатом в области анизотропии КЛ СВЭ, полученным за последние годы, является обнаружение коллаборацией ТА так называемого «горячего пятна» (hotspot) с избыточным потоком КЛ с энергией более 57 ЭэВ [49]. На момент публикации «горячее пятно» представляло собой область радиусом 20° с центром в точке $(\alpha, \delta) = (146.7^{\circ}, 43.2^{\circ})$. Внутри этой области было зарегистрировано 19 событий (из 72 зарегистрированных за 5 лет работы установки) при ожидаемом числе 4.49. Априорная статистическая значимость такого отклонения от изотропного распределения составила 5.1σ ; апостериорная значимость, учитывающая вероятность случайного появления такого пятна, — 3.4*\sigma*. Последующие два года наблюдений подтвердили существование «горячего пятна», но не привели к увеличению статистической значимости отклонения от ожидаемого изотропного распределения: на момент последней публикации число событий, зарегистрированных внутри пятна, составляло 24 при ожидаемом числе 6.88 [50] (рис. 6).

В настоящее время не ясно, что могло привести к появлению «горячего пятна», которое расположено недалеко от плоскости Сверхгалактики, но не содержит очевидных кандидатов на роль ускорителей КЛ столь высоких энергий. Коллаборация ТА высказала предположение, что «горячее пятно» может быть связано с ближайшей к Млечному Пути группой галактик или структурой, соединяющей Млечный Путь со скоплением галактик Дева (Virgo); если же зарегистрированные КЛ являются тяжелыми ядрами, как следует из результатов Оже, то они могли быть ускорены источниками в плоскости Сверхгалактики и затем отклонены магнитными полями [49].

5. Нейтрино и фотоны сверхвысоких энергий

Важным направлением исследований в области КЛ СВЭ являются попытки зарегистрировать события, порожденные нейтрино и фотонами с энергиями более 1 ЭэВ. Эти работы получили новый импульс в последние несколько лет, после регистрации экспериментом IceCube астрофизических нейтрино с энергиями от 30 ТэВ до нескольких ПэВ [51]. Интерес к регистрации нейтрино и фотонов СВЭ объясняется целым рядом причин.

Будучи электрически нейтральными частицами, нейтрино и фотоны распространяются в пространстве, не испытывая отклонений в магнитных полях и, таким образом, указывая на направление своего рождения. Нейтрино исключительно слабо взаимодействуют с веществом и благодаря этому могут преодолевать практически неограниченные расстояния (по крайней мере, до красных смещений $z \sim 30$), неся, таким образом, информацию об источниках находящихся далеко за пределами сферы, ограниченной эффектом ГЗК. Более того, в случае транзиентных источников, например гамма-всплесков, регистрация нейтрино и фотонов (и, возможно, гравитационных волн) может оказаться единственным средством получения информации для понимания процессов в таком источнике [52].

Как уже говорилось выше, при энергиях порядка 50 ЭэВ протоны и более тяжелые ядра взаимодействуют с реликтовым микроволновым излучением, что приводит к рождению космогенных нейтрино, типичная энергия которых составляет приблизительно 1/20 от энергии первичной частицы [53], а также фотонов. В этом смысле КЛ предельно высоких энергий являются «гарантированным» источником нейтрино и фотонов. Протоны при взаимодействии с фотонным фоном производят, как правило, большее число космогенных нейтрино, чем составные ядра тех же энергий [54, 55]. Это связано с тем, что порог фоторождения пионов — основного процесса, в результате которого производятся нейтрино СВЭ, — пропорционален массе ядра. В то же время ядра активно теряют энергию в результате фотодезинтеграции на микроволновом и инфракрасном фоне. Последний процесс также может приводить к образованию нейтрино в результате бета-распада нестабильных промежуточных ядер и нейтронов, однако в данном случае энергия вторичных нейтрино на 3-4 порядка ниже энергии первичных ядер. Указанные соображения позволяют судить о массовом составе первичных КЛ по нейтринному сигналу или его отсутствию.

Примерно то же самое можно сказать и о фотонах СВЭ, но с одной оговоркой. В отличие от нейтрино, фотоны СВЭ активно взаимодействуют с реликтовым фоном, рождая электрон-позитронные пары, и поэтому при энергиях ~ 100 ЭэВ имеют шанс долететь до наблюдателя лишь с расстояний не более 10 Мпс. В этом принципиальное отличие нейтринного сигнала от ГЗК-фотонов. В то время как первый аккумулируется на космологических расстояниях и поэтому сильно зависим от эволюции источников, последний чувствителен лишь к конфигурации источников внутри сферы ГЗК.

Еще одним источником нейтрино является их рождение при распаде заряженных пионов, родившихся при взаимодействии КЛ с веществом и/или излучением в таких потенциальных ускорителях КЛ СВЭ, как гамма-всплески, АЯГ и др. [56, 57]. Если КЛ СВЭ рождаются при распаде других, более тяжелых частиц («top-down»-модели), то это должно приводить к значительным потокам вторичных фотонов и нейтрино [58], которые значительно превышают потоки, ожидаемые в том случае, если нейтрино и фотоны являются вторичными продуктами взаимодействия адронов с реликтовым излучением. Полученные к настоящему времени ограничения на величину потоков (см. ниже) отвергают или, по крайней мере, сильно ограничивают возможность того, что процессы, предлагаемые в top-down-моделях, могут обеспечить существенную долю потока КЛ СВЭ, за исключением, быть может, самых высоких энергий $E \simeq 100$ ЭэВ, где накопленная статистика пока не позволяет сделать определенные выводы. Таким образом, в частности, были получены ограничения на параметры сверхмассивной темной материи [59].

Ограничения на поток фотонов или регистрация даже одного фотонного события СВЭ могут иметь ключевое значение для теорий квантовой гравитации, допускающих нарушение лоренц-инвариантности (см., например, [60, 61]). Аналогично наблюдение нейтрино СВЭ позволит наложить ограничения на возможное нарушение лоренц-инвариантности в нейтринном секторе [62]. Все это стимулирует активные поиски нейтрино и фотонов СВЭ.

Коллаборация Оже к настоящему времени провела целую серию исследований, направленных на поиск нейтринных и фотонных событий СВЭ (см., например, [63–66]). Ниже остановимся только на самых последних результатах.

В недавно опубликованной работе [64] были представлены результаты поиска двух типов событий: «нисходящих» (зенитные углы 60–90°) и «восходящих» (зенитные углы 90–95°). Первые развиваются в атмосфере аналогично адронным ливням (но с существенно большей глубиной первого взаимодействия) и могут порождаться нейтрино всех видов. Вторые могут возникать в том случае, когда тау-нейтрино «чиркает» по земной коре.

В результате исследования не удалось найти ни одного кандидата на роль нейтрино СВЭ, но было получено ограничение на диффузный поток нейтрино одного вида на уровне значимости 90% в предположении степенного спектра $dN(E_{\nu})/dE_{\nu} = k \cdot E^{-2}$ и равного содержания нейтрино различных видов в диапазоне энергий $1.0 \cdot 10^{17}$ эВ- $2.5 \cdot 10^{19}$ эВ: $k < 6.4 \cdot 10^{-9}$ ГэВ см⁻² с⁻¹ ср⁻¹, которое позволило сделать несколько важных выводов:

1) полученный предел примерно в 4 раза ниже границы Ваксмана-Баккала (Waxman-Bahcall) на рождение нейтрино в оптически тонких источниках [67, 68]; некоторые модели рождения нейтрино в астрофизических источниках таких, как АЯГ, исключены на уровне значимости 90%;

3) существенно ограничены модели космогенных нейтрино, в которых предполагается чисто протонный состав КЛ в источниках.

Коллаборация Оже также впервые экспериментально получила ограничения на поток фотонов с энергиями в области ЭэВ. На уровне значимости 95% показано, что при энергиях выше 2, 3, 5 и 10 ЭэВ доля фотонов в общем потоке КЛ не превышает 3.8, 2.4, 3.5 и 11.6% соответственно [65], что подтвердило полученные ранее оценки потока фотонов с энергией более 10 ЭэВ [69], наложившие сильные ограничения на целый ряд top-down-моделей рождения КЛ СВЭ.

Эксперимент Оже также предпринял поиск точечных источников фотонов с энергией около 1 ЭэВ [66]. В результате не удалось выявить ни одного источника, но были получены верхние оценки потока фотонов по всевозможным направлениям в диапазоне склонений $\delta = -85^\circ \dots 20^\circ$. Это, в свою очередь, позволило наложить ограничения на модели, в которых протоны СВЭ ускоряются в галактических источниках. Со своей стороны, коллаборация ТА на основе данных, собранных за 7 лет работы установки, получила ограничения на поток фотонов с энергией выше 3 ЭэВ [70]. В частности, было показано, что при E > 10 ЭэВ поток фотонов не превышает $4.7 \cdot 10^{-3}$ км⁻² ср⁻¹ год⁻¹ на уровне значимости 95%.

Таким образом, на настоящий момент ни одному из двух экспериментов не удалось надежно зарегистрировать ни одного нейтринного или фотонного события с энергией ≳1 ЭэВ, хотя имеется ряд кандидатов на роль фотонов СВЭ [52]. На рис. 7 показаны имеющиеся на настоящее время ограничения на потоки фотонов и нейтрино сверхвысоких энергий.

В совместном исследовании по поиску корреляции между направлениями прихода астрофизических нейтрино, зарегистрированными в эксперименте IceCube, и КЛ предельно высоких энергий по данным Оже (E > 52 ЭэВ) и ТА (E > 57 ЭэВ) были рассмотрены различные группы нейтринных событий («каскадные» и «трековые») и различные модели отклонения КЛ в магнитных полях [71]. Какой-либо статистически значимой корреляции между направлениями прихода нейтрино и КЛ обнаружить не удалось. Коллаборации планируют продолжать исследования такого рода по мере накопления новых данных.

В связи с попытками обнаружить нейтрино СВЭ представляет интерес недавняя публикация коллаборации ANITA о регистрации трех приблизительно горизонтальных и одного восходящего события с энергиями в диапазоне 0.6–10 ЭэВ [72]. С точки зрения коллаборации, в том случае, если



Рис. 7. Слева: ограничения на поток фотонов, полученные в экспериментах AGASA (A), Оже (PA), ТА и на Якутской установке ШАЛ (Y) [70]. Справа: экспериментальные ограничения на поток нейтрино и предсказания некоторых моделей [7]

источником восходящего события является распад тау-лептона, это может потребовать пересмотра сечений взаимодействия тау-нейтрино в Стандартной модели.

6. Источники КЛ СВЭ и диффузное γ -излучение

Информацию о природе КЛ СВЭ и их возможных источниках можно почерпнуть не только из прямых измерений, но и по вторичным сигналам, которые должны возникать вследствие взаимодействий КЛ с межгалактическим фотонным фоном. Это космогенные нейтрино и фотоны, о которых шла речь выше, а также диффузное ү-излучение. Протоны и ядра с энергией выше ЭэВ производят электрон-позитронные пары. Последние порождают быстрый электрон-фотонный каскад за счет цепочки обратного комптоновского рассеяния электронов на фоновых фотонах и рождения фотонами на том же фоне электрон-позитронных пар. В результате электроны и фотоны быстро теряют энергию, а их число экспоненциально растет. Быстрое развитие электрон-фотонного каскада заканчивается при достижении фотонами порога рождения пар на инфракрасном фоне, т. е. при энергии порядка нескольких ТэВ. Для фотонов с энергией ниже 200 ГэВ Вселенная становится прозрачной. Энергия электронов при этом постепенно практически полностью перекачивается в стерильные фотоны. Таким образом, вся энергия, выделяемая КЛ СВЭ в виде фотонов и электронов, аккумулируется в виде диффузного *ү*-излучения в диапазоне энергий от десятков МэВ до ТэВ.

В настоящее время благодаря спутниковому эксперименту Fermi LAT [73], а также его предшественнику EGRET, спектр диффузного γ -излучения измерен в диапазоне от 100 МэВ до 820 ГэВ. Предполагается, что, помимо КЛ СВЭ, вклад в диффузное γ -излучение дают фотоны, излученные в астрофизических объектах, в частности в АЯГ, а также, возможно, продукты аннигиляции или распада темной материи. В работе [74] было впервые продемонстрировано, что гарантированный вклад от КЛ СВЭ может превышать прямые вклады от астрофизических объектов. Причем аналогично ситуации с нейтрино поток диффузного γ -излучения оказывается чувствительным к предполагаемой эволюции источников и первичному составу КЛ СВЭ. Последнее связано с тем, что протоны и легкие ядра более эффективно рождают электрон-позитронные пары, чем тяжелые ядра тех же энергий. По мере уточнения данных по γ -излучению уточнялись и ограничения на эволюцию и состав источников КЛ ПВЭ [75, 76].

На настоящий момент модели, предполагающие чисто протонный первичный состав КЛ предельно высоких энергий, находятся на грани исключения из-за перепроизводства каскадного излучения выше 500 ГэВ [76, 77]. В то же время, как отмечалось ранее, анализ массового состава КЛ СВЭ в экспериментах Оже, Telescope Array и HiRes указывает на легкий состав как минимум в диапазоне энергий 1-4 ЭэВ. Противоречия можно избежать, предположив, что популяция источников КЛ сосредоточена в области сравнительно небольших красных смещений. Среди кандидатов на роль астрофизических ускорителей такому критерию удовлетворяют лацертиды. Следует однако отметить, что плотность таких объектов во Вселенной не слишком велика, в связи с чем ожидается существенный вклад ближайших источников, что, в свою очередь, может иметь последствия для анизотропии потока КЛ СВЭ.

7. Будущие эксперименты

Как мы уже отметили в первой части обзора, все действующие в настоящее время эксперименты находятся в состоянии модернизации, расширения, усовершенствования. Тем не менее, и это тоже отмечено выше, все существующие наземные установки обладают принципиальными недостатками, устранение которых едва ли возможно в обозримом будущем, поскольку потребует огромных финансовых затрат. К ним, в первую очередь, относятся сравнительно небольшая экспозиция, не позволяющая набрать статистику, достаточную для получения определенных выводов о составе и происхождении КЛ СВЭ, а также неполное покрытие небесной сферы, что имеет большое значение для изучения анизотропии направлений прихода КЛ. Очевидно, что эксперимент, который был бы в состоянии получить с хорошей точностью и достаточной статистикой независимые данные и сделать определенные выводы относительно энергетического спектра и массового состава КЛ, особенно в области самых высоких энергий, имел бы огромное значение для разрешения существующей ситуации. Более того, нельзя исключать вероятность того, что спектр и/или состав КЛ СВЭ могут отличаться в различных полушариях (гипотеза близких источников) и соответственно Оже и ТА наблюдают немного различные объекты. Космический эксперимент, который может регистрировать КЛ СВЭ со всех направлений небесной сферы, имеет уникальную возможность это проверить.

Принцип действия всех орбитальных детекторов КЛ СВЭ основан на регистрации ультрафиолетового флуоресцентного и черенковского излучения, которые появляются при развитии ШАЛ, порождаемого при вхождении в атмосферу первичной космической частицы. Число флуоресцентных фотонов, испущенных в любой точке трека ШАЛ, пропорционально числу заряженных частиц в каскаде, преимущественно электронов и позитронов. Таким образом, атмосфера Земли, попадающая в поле зрения детектора, выступает в роли гигантского калориметра. Черенковский свет, отраженный от поверхности, является дополнительным источником информации о событии. Данные об обоих видах излучения, зарегистрированные детектором, используются для восстановления направления прихода и энергии первичной частицы, а также для определения глубины максимума и других характеристик ливня. Идея регистрации КЛ с орбиты была впервые предложена Бенсоном и Линсли более 30 лет назад [78], но до последнего времени не была реализована ввиду целого ряда научных и технологических сложностей, связанных с необходимостью распознавать и регистрировать слабый поток УФ-фотонов, порождаемых ШАЛ, на фоне постоянно меняющейся атмосферы Земли, «зашумленной» многочисленными источниками света. Первой реализацией стал эксперимент ТУС, о котором рассказано в первой части обзора.

ТУС является первопроходцем в области орбитального детектирования КЛ СВЭ, но обладает скромными техническими характеристиками, которые не позволяют рассчитывать на научный прорыв. Поэтому в России и за рубежом активно ведется разработка орбитальных детекторов следующего поколения, а именно телескопа-рефлектора КЛПВЭ (космические лучи предельно высоких энергий, KLPVE), предназначенного для установки на Российском сегменте МКС [79], и телескопа-рефрактора JEM-EUSO [80, 81]. Оптическая система детектора КЛПВЭ в базовом варианте будет состоять из зеркала диаметром 3.4 м и линзы-корректора диаметром 1.7 м. Телескоп JEM-EUSO будет включать в себя три линзы Френеля диаметром 2.65 м. Оба детектора также будут оборудованы фотоприемниками с числом пикселей порядка нескольких сотен тысяч. Поле зрения КЛПВЭ составит ±14°, JEM-EUSO - $\pm 30^{\circ}$. Угловое разрешение будет достигать 1 мрад. Детекторы будут полностью эффективны для регистрации КЛ с энергиями выше ~30 ЭэВ (КЛПВЭ)



Рис. 8. Слева: возможная схема размещения детектора КЛПВЭ (KLPVE) на Малом исследовательском модуле российского сегмента МКС [79]. Справа: возможный внешний вид детектора JEM-EUSO и схема его работы [80]

и ~ 60 ЭэВ (JEM-EUSO). Схемы работы и размещения детекторов на МКС показаны на рис. 8.

Основными научными задачами этих экспериментов является регистрация космических лучей, нейтрино и фотонов сверхвысоких энергий со статистикой, недостижимой наземными экспериментами. Согласно расчетам, при энергиях выше 30–60 ЭэВ годовая экспозиция детекторов КЛПВЭ и JEM-EUSO будет превышать годовую экспозицию Оже в 2 и 9 раз соответственно [79, 82, 83]. Благодаря этому, в частности, оба детектора предоставят прекрасные возможности для независимой проверки существования «горячего пятна» КЛ с энергиями более 57 ЭэВ, обнаруженного коллаборацией ТА [84].

Наконец, необходимо упомянуть проект ARA (Askaryan Radio Array), который планируется в ближайшем будущем реализовать в Антарктиде [85]. В данном эксперименте нейтрино энергий в диапазоне 10¹⁶–10¹⁹ эВ будут детектироваться по их радиоизлучению, возникающему в результате эффекта Аскаряна.

Заключение

За последние несколько лет в области физики космических лучей сверхвысоких энергий получен целый ряд важнейших результатов, в частности надежно установлено обрезание энергетического спектра в области, предсказанной пятьдесят лет назад Грейзеном, Зацепиным и Кузьминым. Тем не менее, важнейшие вопросы о составе и источниках КЛ СВЭ остаются по-прежнему открытыми. Действующие в настоящее время и разрабатываемые новые эксперименты дают основания надеяться на существенный прогресс в решении этих проблем в течение ближайшего десятилетия.

Авторы благодарны рецензенту за ценные замечания, которые позволили существенно улучшить статью.

Работа поддержана грантом Президента РФ (МК-4167.2015.2).

Список литературы

- 1. Linsley J., Scarsi L., Rossi B. // Phys. Rev. Letters. 1961. 6. P. 485.
- 2. Linsley J. // Phys. Rev. Letters. 1963. 10. P. 146.
- Птицына К.В., Троицкий С.В. // УФН. 2010. 180.
 С. 723. (Ptitsyna K.V., Troitsky S.V. // Physics Uspekhi. 2010. 53. P. 691.)
- Kotera K., Olinto A.V. // Annu. Rev. Astron. Astrophys. 2011. 49. P. 119.
- Aab A., Abreu P., Aglietta M. et al. // Nucl. Instr. and Methods in Phys. Res. A. 2015. 798. P. 172.
- 6. Valiño I. // Proc. of Science (ICRC2015). 2015. 271.
- 7. *Aab A., Abreu P., Aglietta M.* et al. // arXiv: 1604.03637. 2016.
- Fukushima M. // Eur. Phys. J. Web of Conferences. 2015. 99. P. 04004.
- Tinyakov P., Fukushima M., Ikeda D. et al. // Proc. of Science (ICRC2015). 2015. 326.

- 10. Sagawa T. // Proc. of Science (ICRC2015). 2015. 657.
- Knurenko S., Petrov I., Petrov Z., Sleptsov I. // EPJ Web of Conferences. 2015. 99. P. 04001.
- Knurenko S., Petrov I. // EPJ Web of Conferences. 2015. 99. P. 04003.
- Askar'yan G.A. // Sov. J. of Experim. and Theor. Phys. 1965. 21. P. 658.
- 14. Schoorlemmer H., Belov K., Romero-Wolf A. et al. // Astropart. Phys. 2016. 77. P. 32.
- 15. *Ryabov V.A., Chechin V.A., Gusev G.A., Maung K.T.* // Adv. in Space Research. 2016. **58**. P. 464.
- Panasyuk M., Khrenov B., Klimov P. et al. // Experimental Astronomy. 2015. 40, N. 1. P. 315.
- 17. Greisen K. // Phys. Rev. Letters. 1966. 16. P. 748.
- Зацепин Г.Т., Кузьмин В.А. // Письма ЖЭТФ. 1966.
 4. С. 114. (Zatsepin G.T., Kuz'min V.A. // Sov. J. of Experim. and Theor. Phys. Lett. 1966.
 4. P. 78.)
- Bergman D.R., High Resolution Fly's Eye Collab. // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 2007. 165. P. 19.
- 20. Abbasi R.U., Abu-Zayyad T., Allen M. et al. // Phys. Rev. Lett. 2008. 100, N. 10. 101101.
- 21. Abraham J., Abreu P., Aglietta M. et al. // Phys. Rev. Letters. 2008. **101**, N. 6. 061101.
- Abu-Zayyad T., Aida R., Allen M. et al. // Astrophys. J. Lett. 2013. 768. L1.
- 23. Ivanov D. // Proc. of Science (ICRC2015). 2015. 349.
- Dawson B.R., Mariş I.C., Roth M. et al. // Eur. Phys. J. Web of Conf. 2013. 53. P. 1005.
- 25. AbuZayyad T. // Proc. of Science (ICRC2015). 2015. 422.
- 26. Kostunin D., Budnev N.M., Gress O.A. et al. // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. A. 2014. **742**. P. 89.
- Schröder F.G. // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. A. 2016. 824. P. 648.
- Aab A., Abreu P., Aglietta M. et al. // Phys. Rev. D. 2014. 90, N. 12. 122005.
- 29. Aab A., Abreu P., Aglietta M. et al. // Phys. Rev. D. 2014. 90, N. 12. 122006.
- Werner K., Liu F.M., Pierog T. // Phys. Rev. C. 2006.
 74, N. 4. 044902.
- 31. Ostapchenko S. // Phys. Rev. D. 2006. 74, N. 1. 014026.
- 32. Ahn E.J., Engel R., Gaisser T.K. et al. // Phys. Rev. D. 2009. **80**, N. 9. 094003.
- 33. Abbasi R.U., Abe M., Abu-Zayyad T. et al. // Astropart. Phys. 2015. **64**. P. 49.
- 34. Unger M. // Proc. of Science (ICRC2015). 2015. 307.
- Abbasi R., Bellido J., Belz J. et al. // Proc. of Intern. Symp, for Ultra-High Energy Cosmic Rays (UHE-CR2014). 2016. 9. P. 010016.
- Aab A., Abreu P., Aglietta M. et al. // Astrophys. J. 2015. 802. 111.
- de Almeida R.M. // Proc. 33rd Int. Cosmic Ray Conf. (Rio de Janeiro). 2013. 0768.
- Al Samarai I. // Proc. of Science (ICRC2015). 2015.
 372.
- Fukushima M., Ivanov D., Kido E. et al. // Proc. 33rd Int. Cosmic Ray Conf. (Rio de Janeiro). 2013. 0935.
- 40. Aab A., Abreu P., Aglietta M. et al. // Astrophys. J. 2014. **794**. 172.
- 41. Deligny O. // Proc. of Science (ICRC2015). 2015. 395.
- 42. Abraham J., Abreu P., Aglietta M. et al. // Science. 2007. 318. P. 938.
- Abraham J., Abreu P., Aglietta M. et al. // Astropart. Phys. 2008. 29. P. 188.

- 44. Abreu P., Aglietta M., Ahn E.J. et al. // Astropart. Phys. 2010. **34**. P. 314.
- 45. Aab A., Abreu P., Aglietta M. et al. // Astrophys. J. 2015. 804. 15.
- 46. *Abu-Zayyad T., Aida R., Allen M.* et al. // Astrophys. J. 2013. **777**. 88.
- 47. Abreu P., Aglietta M., Ahlers M. et al. // Astrophys. J. Lett. 2012. **755**. L4.
- Abbasi R.U., Abe M., Abu-Zayyad T. et al. // Astrophys. J. 2015. 804. 133.
- 49. Abbasi R.U., Abe M., Abu-Zayyad T. et al. // Astrophys. J. Lett. 2014. **790**. L21.
- Kawata K., Fukushima M., Ikeda D. et al. // Proc. of Science (ICRC2015). 2015. 276.
- 51. Aartsen M.G., Ackermann M., Adams J. et al. // Phys. Rev. Letters. 2014. 113. P. 101101.
- Karg T., Alvarez-Muñiz J., Kuempel D. et al. // Proc. of Intern. Symp. for Ultra-High Energy Cosmic Rays (UHECR2014). 2016. 010021.
- 53. Beresinsky V.S., Zatsepin G.T. // Physics Letters B. 1969. 28. P. 423.
- 54. Ave M., Busca N., Olinto A.V. et al. // Astropart. Phys. 2005. 23. P. 19.
- 55. *Hooper D., Taylor A., Sarkar S. //* Astropart. Phys. 2005. 23. P. 11.
- Halzen F., Hooper D. // Rep. on Progr. in Phys. 2002.
 65. P. 1025.
- 57. Becker J.K. // Phys. Reports. 2008. 458. P. 173.
- Bhattacharjee P., Sigl G. // Phys. Reports. 2000. 327. P. 109.
- Kalashev O.E., Rubtsov G.I., Troitsky S.V. // Phys. Rev. D. 2009. 80. P. 103006.
- Galaverni M., Sigl G. // Phys. Rev. Lett. 2008. 100, N. 2. 021102.
- Rubtsov G., Satunin P., Sibiryakov S. // Phys. Rev. D. 2014. 89, N. 12. 123011.
- Mattingly D.M., Maccione L., Galaverni M. et al. // J. of Cosmol. and Astropart. Phys. 2010. 2. 007.
- Abreu P., Aglietta M., Ahlers M. et al. // Adv. in High Energy Physics. 2013. 2013. 708680.
- 64. Aab A., Abreu P., Aglietta M. et al. // Phys. Rev. D. 2015. **91**, N. 9. 092008.
- 65. Abraham J., Abreu P., Aglietta M. et al. // Astropart. Phys. 2009. **31**. P. 399.

- 66. *Aab A., Abreu P., Aglietta M.* et al. // Astrophys. J. 2014. **789**. 160.
- Waxman E., Bahcall J. // Phys. Rev. D. 1999. 59, N. 2. 023002.
- 68. Bahcall J., Waxman E. // Phys. Rev. D. 2001. 64, N. 2. 023002.
- 69. Abraham J., Abreu P., Aglietta M. et al. // Astropart. Phys. 2008. **29**. P. 243.
- Rubtsov G., Fukushima M., Ivanov D. et al. // Proc. of Science (ICRC2015). 2015. 331.
- IceCube Collab., Pierre Auger Collab., Telescope Array Collab. // J. of Cosmol. and Astropart. Phys. 2016. 1. 037.
- 72. Gorham P.W., Nam J., Romero-Wolf A. et al. // arXiv: 1603.05218. 2016.
- 73. Ackermann M. et al. // Astrophys. J. 2015. 799. P. 86.
- 74. Kalashev O.E., Semikoz D.V., Sigl G. // Phys. Rev. 2009. **D79**. P. 063005.
- Gelmini G., Kalashev O., Semikoz D. // JCAP. 2012.
 1201. P. 044.
- 76. Gavish E., Eichler D. // arXiv: 1603.04074. 2016.
- 77. Liu R.Y., Taylor A.M., Wang X.Y., Aharonian F.A. // arXiv: 1603.03223. 2016.
- Benson R., Linsley J. // Proc. 17th Int. Cosmic Ray Conf. (Paris). 1981. 8. P. 145.
- 79. Panasyuk M.I., Casolino M., Garipov G.K. et al. // J. of Phys. Conf. Series. 2015. 632, N. 1. 012097.
- Haungs A. // J. of Phys. Conf. Series. 2015. 632, N. 1. 012092.
- 81. Adams J.H. J., Ahmad S., Albert J.N. et al. // Experim. Astron. 2015. **40**, N. 1. P. 19.
- Sakaki N., Ogio S., Fenu F. et al. // Proc. of Science. (ICRC2015). 2015. 647.
- Adams J.H., Ahmad S., Albert J.N. et al. // Astropart. Phys. 2013. 44. P. 76.
- Semikoz D., Tinyakov P., Zotov M. // Phys. Rev. D. 2016. 93. 103005.
- Allison P., Auffenberg J., Bard R. et al. // Astropart. Phys. 2012. 35. P. 457.
- 86. Porcelli A. // Proc. of Science (ICRC2015). 2015. 420.
- Hanlon W., Ikeda D. // Proc. of Science (ICRC2015). 2015. 362.

The current status of research in ultrahigh-energy cosmic ray physics: A brief review

M. Yu. Zotov^{1,a}, O. E. Kalashev², M. S. Pshirkov^{2,3,b}

¹Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University (SINP MSU), Moscow 119991, Russia.

²Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow 117312, Russia.

³ Sternberg Institute of Astronomy, Lomonosov Moscow State University (SAI MSU),

Moscow 119991, Russia

E-mail: ^a zotov@eas.sinp.msu.ru, ^b pshirkov@sai.msu.ru.

The origin and nature of ultrahigh-energy cosmic rays (UHECRs, $E > 10^{18}$ eV) is one of the most intriguing unsolved problems of modern astrophysics. This review is dedicated to the current status of research in this field. We describe the largest ongoing experiments carried out at the Pierre Auger Observatory and Telescope Array, at the first orbital detector of UHECRs, that is, TUS, and for the KLPVE and JEM-EUSO orbital telescopes, which are currently being developed. We discuss the latest results on the energy spectrum and mass composition of UHECRs and the relationship between UHECRs on the one hand and ultrahigh-energy neutrinos and photons on the other. Finally, we review the latest results on the anisotropy of the arrival directions of UHECRs, which is a crucially important area of research in the search for astrophysical sources of cosmic rays in the highest energy range.

АСТРОНОМИЯ, АСТРОФИЗИКА И КОСМОЛОГИЯ

Keywords: ultrahigh-energy cosmic rays, review, energy spectrum, mass composition, anisotropy, experiments. PACS: 95.55.Vj, 95.85.Ry, 95.85.Pw, 96.50.sb, 96.50.sd. *Received 24 June 2016.*

English version: Moscow University Physics Bulletin. 2017. 72, No. 2. Pp. 144-156.

Сведения об авторах

- 1. Зотов Михаил Юрьевич канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-57-35, e-mail: zotov@eas.sinp.msu.ru.
- 2. Калашев Олег Евгеньевич канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: kalashev@inr.ac.ru.
- 3. Пширков Максим Сергеевич канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-50-06; e-mail: pshirkov@sai.msu.ru.