

Троицкий Сергей Вадимович

**Космические лучи  
сверхвысоких энергий: состав и  
проблема источников**

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

*АВТОРЕФЕРАТ*

*диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук*

Москва 2008

Работа выполнена в Институте ядерных исследований Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук *Ж.-А. М. Джилкибаев*

доктор физико-математических наук *Н. Н. Калмыков*

доктор физико-математических наук *В. С. Птускин*

Ведущая организация:

Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской Академии наук

Защита диссертации состоится «        » \_\_\_\_\_ 2009 г.

в        часов        мин. на заседании диссертационного совета Д 002.119.01  
в Институте ядерных исследований РАН по адресу: 117312 Москва, про-  
спект 60-летия Октября, дом 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института ядерных  
исследований РАН.

Автореферат разослан «        » \_\_\_\_\_ 2009 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.119.01

кандидат физико-математических наук

*Б. А. Тулунов*

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Интерес к природе космических лучей сверхвысоких (более  $10^{19}$  эВ) энергий со стороны исследователей, работающих как в физике элементарных частиц, так и в астрофизике, не ослабевает на протяжении десятилетий. В течение долгого времени он подогревался предсказанием Грейзена, Зацепина и Кузьмина об обрезании спектра космических протонов при энергиях выше  $\sim 7 \times 10^{19}$  эВ, соответствующих порогу рождения пи-мезонов во взаимодействиях протонов с фотонами реликтового излучения (эффект ГЗК), и одновременным экспериментальным наблюдением широких атмосферных ливней (ШАЛ), вызванных первичными частицами, чья реконструированная энергия превышала  $10^{20}$  эВ. 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. Эти две группы вопросов сохраняют актуальность и во многом определяют развитие исследований на стыке физики элементарных частиц и астрофизики и в настоящее время.

Изучение физики космических лучей сверхвысоких энергий ограничено двумя основными трудностями, связанными со спецификой исследуемых явлений. Во-первых, поток таких космических частиц очень мал (в среднем за год на один квадратный километр попадает одна частица рассматриваемой энергии). 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, скажем, с числом фотонов астрофизического 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 сотни ТэВ), поэтому модели, с помощью которых характер развития атмосферного ливня связывается со свойствами первичной частицы, с неизбежностью включают экстраполяцию свойств взаимодействия в неизученную область энергий (и переданных импульсов). К сожалению, на настоящий момент не существует модели взаимодействия адронов, полностью согласующейся с экспериментальными данными о развитии ливней. В сложившейся ситуации особый интерес представляют выводы относительно природы космических частиц сверхвысоких энергий, наименее зависящие от конкретных моделей, используемых при обработке экспериментальных данных.

Совершенствование экспериментальной техники, и в первую очередь запуск больших установок Pierre Auger и Telescope Array, привело к существенному увеличению количества зарегистрированных событий сверхвысоких энергий (тысячи событий в год). Это позволяет существенно уменьшить статистическую неопределенность конкретных количественных результатов и ставит более остро вопрос о систематических ошибках

и о несовершенстве теоретических моделей. Особую актуальность в этой ситуации представляет совместный анализ разных аспектов физики космических лучей сверхвысоких энергий, прежде рассматривавшихся по отдельности. Такой подход может пролить свет на вопрос о происхождении космических частиц сверхвысоких энергий, представляющий собой серьезную научную проблему.

Повышение точности геометрической реконструкции направления прихода первичной частицы ШАЛ в сочетании с увеличением количества зарегистрированных событий позволило в последние годы говорить о рождении новой области знания – астрономии сверхвысоких энергий. Как и классическая астрономия, она изучает, прежде всего, два вопроса – определение источников излучения и исследование их физических характеристик, совместных с таким излучением. Поскольку в условиях небольшого количества данных, плохого углового разрешения и неизвестных отклонений в магнитных полях идентификация источников представляет собой трудную задачу, на протяжении долгого времени исследовался в основном второй вопрос, который в контексте сверхвысоких энергий следует формулировать как определение круга возможных источников, допускающих ускорение частиц до наблюдаемых энергий. После того, как этот круг очерчен, можно искать источники по экспериментальным данным. В то время как в отношении источников космических лучей с энергиями до  $\sim 10^{17}$  эВ имеется относительная ясность, круг потенциальных ускорителей сверхвысоких энергий был определен заметно менее четко, а в соответствующей литературе имеются противоречивые высказывания на этот счет. Вопрос об определении источников частиц с энергиями выше  $10^{19}$  эВ сейчас приобретает особую актуальность, так

как новые экспериментальные данные открывают реальные возможности приблизиться к его решению.

Одной из наиболее важных и интересных проблем физики космических лучей сверхвысоких энергий является определение состава первичных частиц, вызывающих ШАЛ. Важная сама по себе, эта задача также имеет принципиальное значение для корректного определения энергии отдельных частиц, а значит, и для построения спектра. Определение типа первичных частиц существенно и для понимания их происхождения, так как различные теоретические модели предсказывают разный состав. Например, модели, в которых космические лучи сверхвысоких энергий являются продуктами распада сверхтяжелых частиц темной материи, предсказывают наличие существенной доли первичных фотонов при самых высоких энергиях. Что касается астрофизических источников, то различные условия для ускорения в них легких и тяжелых ядер определяют связь между составом адронной компоненты космических частиц и классами потенциальных источников, в которых реализуются различные режимы ускорения.

Вопрос об источниках космических лучей сверхвысоких энергий относится к области исследований на стыке астрофизики и физики элементарных частиц, и его исследование важно как для той, так и для другой области знания. С одной стороны, даже сам факт ускорения частиц до экстремальных энергий в определенных астрофизических объектах дает весьма ценную информацию о физических условиях в них. В сочетании с более детальными сведениями о составе и спектре ускоренных частиц эта информация позволяет существенно дополнить представления об источниках, полученные традиционными астрофизическими методами. С

другой стороны, анализ процессов, происходящих в источнике при экстремальных, недостижимых в лабораторных условиях, энергиях, а также при последующем распространении энергичных частиц от источника до наблюдателя, может существенно изменить наше понимание взаимодействий элементарных частиц при высоких энергиях и дать указания на существование новых частиц или взаимодействий.

**Цель работы** состоит в проведении анализа процессов, определяющих физику космических лучей с энергиями выше  $10^{19}$  эВ (включая ускорение частиц в астрофизических источниках, их распространение во Вселенной, развитие широких атмосферных ливней и реконструкцию их экспериментальными установками) на основе методов, минимизирующих модельную зависимость, и в построении непротиворечивой картины происхождения космических частиц сверхвысоких энергий, согласующейся с данными различных регистрирующих их экспериментов, с результатами астрономических наблюдений и с теоретическими представлениями.

### **Научная новизна и практическая ценность.**

- Впервые анализ типа первичной частицы широкого атмосферного ливня проведен для индивидуальных событий. Разработан новый метод такого анализа, который применен для получения наиболее сильных ограничений на долю первичных фотонов при сверхвысоких энергиях и для анализа состава первичных адронов.
- Впервые непосредственно изучены искусственные флуктуации, привносимые использованием приближения прореживания при моделировании широких атмосферных ливней, и предложен новый способ их подавления.

- Проведено новое комплексное исследование физических условий в потенциальных астрофизических источниках космических частиц сверхвысоких энергий на основе использования современных астрономических данных и систематического анализа различных режимов ускорения.
- Построен новый каталог галактик, полный вплоть до расстояния в 270 Мпк от Земли и корректно отражающий распределение плотности галактик во Вселенной. Для сценария многочисленных внегалактических источников протонов сверхвысоких энергий с помощью этого распределения впервые получены предсказания глобальной анизотропии направлений прихода космических лучей с учетом экспериментальной экспозиции. Разработан новый метод проверки таких предсказаний, ориентированный на будущие космические эксперименты с относительно невысоким угловым разрешением.
- Впервые обнаружены корреляции направлений прихода космических лучей сверхвысоких энергий с гамма-яркими лацертидами и неидентифицированными гамма-источниками.
- Дано новое объяснение анизотропии направлений прихода космических лучей наивысших энергий, наблюдаемой в Южном небесном полушарии.
- Предложен новый метод изучения протяженного изображения гамма-источников во время покрытия источника Солнцем.
- Впервые обнаружено экспериментальное свидетельство в пользу существования нейтральных частиц сверхвысоких энергий, распространяющихся на космологически большие расстояния. Дано прин-



ципиально новое объяснение этого эффекта, которое позволяет решить также ряд других астрофизических проблем.

- Методы и подходы, разработанные в настоящей диссертации, используются для анализа данных Якутской комплексной установки ШАЛ и экспериментов HiRes и Telescope Array. Планируется их использование также в будущих экспериментах TALE, TUC и SEUSO.

### **На защиту выносятся следующие основные результаты:**

1. Разработан метод изучения состава первичных частиц космических лучей сверхвысоких энергий, основанный на индивидуальном анализе событий и позволяющий достичь заметно большей точности по сравнению с традиционным подходом. Этот метод применен для анализа данных, полученных экспериментом AGASA и Якутской комплексной установкой ШАЛ. В результате поставлены наиболее сильные в мире ограничения на долю первичных фотонов при энергиях свыше  $10^{20}$  эВ (36%) и свыше  $4 \times 10^{19}$  эВ (22%) и получены указания на заметную ( $48\%_{-19}^{+20}$ ) долю тяжелых ядер при энергиях свыше  $2 \times 10^{19}$  эВ (уровень достоверности 95%).
2. Изучены искусственные флуктуации, вносимые процедурой прорезивания в физические наблюдаемые, реконструируемые из моделируемых методом Монте-Карло широких атмосферных ливней, и разработан метод подавления таких флуктуаций. На основе моделирования изучены особенности развития ливней, вызванных первичными фотонами, и реконструкции их различными экспериментами. Показано, что энергии первичных фотонов оцениваются раз-

личными экспериментами с относительной систематической ошибкой в несколько раз.

3. Проанализированы физические условия в астрофизических объектах, требуемые для ускорения элементарных частиц до сверхвысоких энергий. На основе анализа новых астрономических данных построена обновленная диаграмма Хилласа, учитывающая наряду с ограничениями из размера источника также ограничения из потерь на излучение. Показано, что лишь самые мощные активные галактики (радиогалактики, квазары и лацертиды) способны ускорить протоны до энергий порядка  $10^{20}$  эВ, в то время как заметно более многочисленные и близкие сейфертовские галактики могут ускорять до таких энергий тяжелые ядра. В согласии с экспериментальными данными, это предопределяет смешанный состав первичных частиц при самых высоких энергиях.
4. Изучено сопутствующее излучение нейтрино и фотонов меньших энергий; показано, что в ряде случаев должно формироваться протяженное изображение источника космических лучей в гаммадиапазоне, и предложен метод наблюдения такого изображения, размер которого меньше углового разрешения телескопа.
5. Построена модель глобального распределения направлений прихода космических лучей сверхвысоких энергий от астрофизических источников, основанная на функции распределения плотности числа галактик на расстояниях до 270 Мпк, вычисленной из специально сконструированной полной однородной выборки галактик, и учете взаимодействий космических частиц сверхвысоких энергий при распространении в межгалактическом пространстве. По-

казано, что современных данных наземных экспериментов недостаточно для изучения глобальной анизотропии, и даны оценки ожидаемого эффекта для астрофизического сценария и для сценария сверхтяжелой темной материи в результатах будущих космических экспериментов (TUC, JEM-EUSO, S-EUSO).

6. Изучена мелкомасштабная анизотропия направлений прихода космических лучей сверхвысоких энергий. Показано, что учет поправок на отклонения заряженных частиц в магнитном поле Галактики приводит к исчезновению кластеров направлений прихода, обнаруженных в данных AGASA и Якутской установки. Обнаружены корреляции направлений прихода частиц, зарегистрированных AGASA и Якутской установкой, с положениями лацертид – источников гамма-излучения и с положениями неидентифицированных гамма-источников. Проведен сравнительный анализ корреляций положений астрофизических источников различных классов с направлениями прихода частиц, зарегистрированных экспериментами AGASA, HiRes и Якутской установкой, и показано, что корреляции с данными всех трех экспериментов наблюдаются лишь у одного класса объектов – у лацертид.
7. На основе анализа физических условий в радиогалактике *Cen A* показано, что она является вероятным ускорителем ядер промежуточной массы до сверхвысоких энергий. Проведен анализ анизотропии направлений прихода космических частиц сверхвысоких энергий, зарегистрированных Обсерваторией Pierre Auger, и показано, что наблюдаемая анизотропия согласуется с этой гипотезой.
8. На основе анализа позиционных корреляций в данных эксперимен-

та HiRes обнаружено указание на наличие нейтральных частиц сверхвысоких энергий от лацертид, не находящее объяснения в рамках Стандартной модели физики элементарных частиц. Сформулирована количественная гипотеза ( $2\%_{-0.5\%}^{+1.5\%}$  событий при энергиях  $E > 10^{19}$  эВ вызваны нейтральными первичными частицами от лацертид) и оценена перспектива ее проверки в будущих экспериментах. Изучены астрофизические характеристики коррелирующих лацертид. Предложено теоретическое объяснение наблюдаемого эффекта, основанное на предположении о существовании легкой ( $m \lesssim 10^{-7}$  эВ) псевдоскалярной частицы, смешивающейся с фотоном во внешнем магнитном поле. Оценены потоки таких частиц от астрофизических источников, сформулированы следствия предлагаемого объяснения, проверка которых также возможна в будущих экспериментах.

**Апробация диссертации.** Основные результаты, полученные в диссертации, доложены автором на научных семинарах ИЯИ РАН, Института теоретической физики Лозаннского университета, Свободного университета Брюсселя, Института физики имени Макса Планка в Мюнхене, Центра атомной энергии в Сакле; на международных семинарах “Кварки–2004” (Пушкинские Горы) и “Кварки–2008” (Сергиев Посад), на четырех международных рабочих совещаниях “Космические лучи сверхвысоких энергий и их источники” (Москва, 2004, 2005, 2006, 2008), на международной конференции “SUSY-2002” (Гамбург), на Всероссийской астрономической конференции (Москва, 2005); использованы в курсе лекций, прочитанном автором на международной Школе современной астрофизики (Дубна, 2005), при ведении семинарских занятий на Меж-

дународной школе по физике высоких энергий (Школа “ЦЕРН–ОИЯИ”, Китцбюль, 2005), в лекциях на Баксанской международной школе “Частицы и космология” (2001, 2003).

**Публикации.** По результатам диссертации опубликована 21 работа.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения и четырех приложений. Общий объем диссертации 300 страниц. Диссертация содержит 75 рисунков, 24 таблицы и список литературы из 399 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность темы, объясняются задачи и описываются методы, использованные в работе, отмечается научная новизна и практическая значимость результатов, дается краткое изложение содержания диссертации, указывается, где диссертация прошла апробацию.

В первой главе диссертации рассматривается экспериментальная информация о типе первичных частиц, получаемая из структуры широких атмосферных ливней. Первый параграф посвящен развитию, применению и обсуждению нового метода анализа состава первичных частиц, основанного на индивидуальном исследовании каждого отдельного события в выборке. Особенности предлагаемого нами метода, определяющими его более высокую точность по сравнению с традиционными, являются сравнение модельных и реальных ливней для каждого события, без усреднения по направлениям прихода, и отбор для такого сравнения моделированных ливней на основе реконструкции их параметров (в первую очередь энергии) с помощью процедуры, полностью аналогичной применяемой для реальных данных. В разделе 1.1 приводится опи-

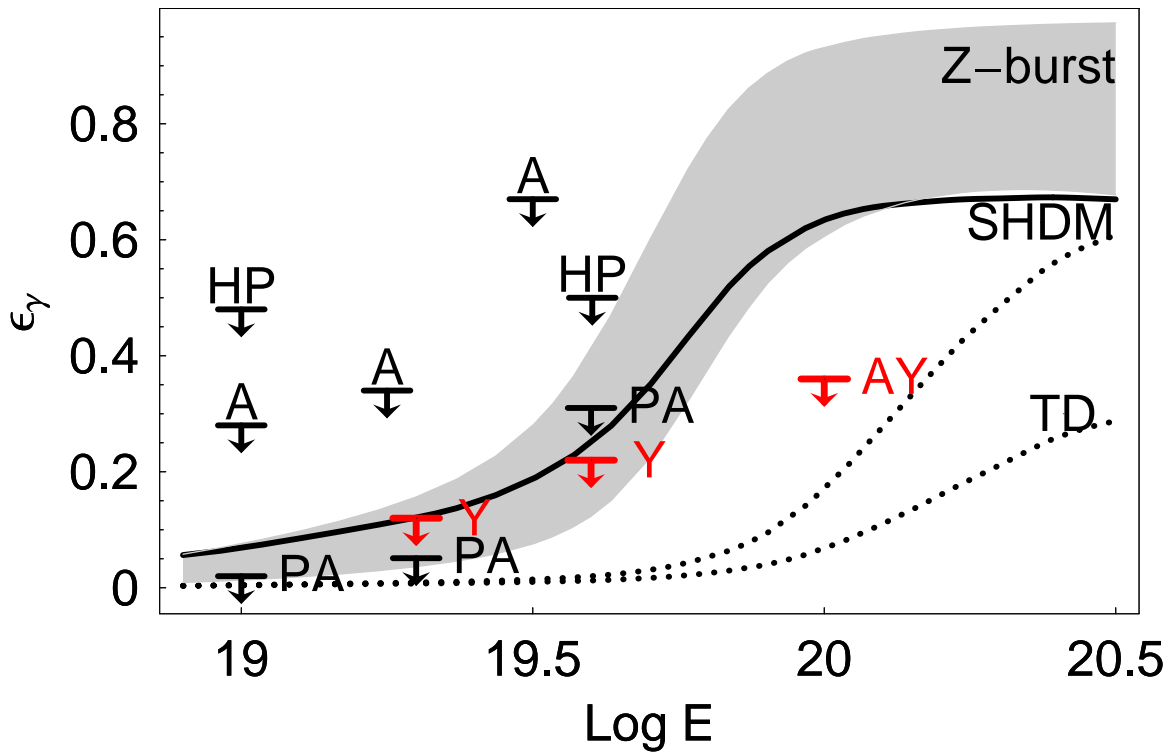


Рис. 1. Ограничения (уровень достоверности 95%) на долю фотонов  $\epsilon_\gamma$  в интегральном потоке космических лучей при различных энергиях. Результаты настоящей работы (Y) и (AY) изображены вместе с ограничениями других авторов (HP, A, PA). Также показаны предсказания модели сверхтяжелой темной материи (жирная линия, масса сверхтяжелой частицы  $M_X = 10^{22}$  эВ), моделей распада топологических дефектов (между пунктирными линиями) и модели Z-вспышек (затененная область). Теоретические кривые нормированы на спектр AGASA. Энергия измеряется в эВ.

сание метода, в разделе 1.2 метод применяется для анализа данных эксперимента AGASA и Якутской комплексной установки ШАЛ на предмет наличия фотонов среди первичных частиц сверхвысоких энергий. Полученные ограничения на уровне достоверности 95% на долю первичных фотонов при энергиях свыше  $10^{20}$  эВ (36%) и свыше  $4 \times 10^{19}$  эВ (22%) являются на сегодняшний день наиболее строгими в мире (см. Рис. 1). В разделе 1.3 метод подсчетного анализа применяется для выборки

событий с реконструированными энергиями  $E > 2 \times 10^{19}$  эВ, зарегистрированных Якутской установкой. Результат указывает на заметную ( $48\%_{-19\%}^{+20\%}$  на уровне достоверности 95%) долю тяжелых ядер при таких энергиях.

В параграфе 2 главы 1 с помощью моделирования развития атмосферных ливней изучается вопрос об особенностях реконструкции параметров событий, вызванных первичными фотонами. В разделе 2.1 решена важная техническая задача контроля над искусственными флуктуациями, возникающими в результате приближений при моделировании атмосферных ливней. Раздел 2.2 иллюстрирует основные отличия развития фотонных ливней от адронных, а в разделе 2.3 рассмотрено влияние этих отличий на реконструкцию энергий первичных фотонов и спектра фотонной компоненты разными экспериментами. Полученные результаты указывают на то, что энергии первичных фотонов, большие  $10^{19}$  эВ, недооцениваются наземным детектором обсерватории Pierre Auger в среднем в четыре раза, что связано с гиперчувствительностью используемых в эксперименте водных баков к мюонной компоненте ливня; эксперимент AGASA немного переоценивает энергию фотонов при самых больших энергиях, а флюоресцентный детектор HiRes оценивает энергии фотонов практически правильно (переоценка  $\sim 10\%$ ), но имеет по отношению к фотонам экспозицию в два раза меньшую, нежели для адронных ливней.

Глава 2 посвящена астрофизическим источникам космических лучей сверхвысоких энергий и проявлениям различных астрофизических сценариев в распределении направлений прихода на небесной сфере. В параграфе 1 проанализированы физические условия в астрофизических объ-

ектах, требуемые для ускорения элементарных частиц до сверхвысоких энергий. В разделе 1.1 дан обзор ограничений на максимальную энергию ускоряемых частиц из геометрических размеров источника (критерий Хилласа) и из потерь на излучение. Показано, что такие потери сильно зависят от механизма ускорения и от конфигурации электромагнитного поля, поэтому требуется рассматривать их отдельно для трех возможных случаев (индуктивное ускорение в режиме потерь на изгибное излучение, индуктивное ускорение в режиме синхротронных потерь и диффузное ускорение). Как геометрические ограничения, так и ограничения из радиационных потерь определяются соотношением между размером источника  $R$  и величиной магнитного поля  $B$ , то есть могут быть представлены на диаграмме Хилласа. С этой целью в разделе 1.2 для всех потенциальных астрофизических ускорителей сверхвысоких энергий собраны основанные на наблюдениях оценки магнитного поля. В ряде случаев такие оценки являются результатом моделирования параметров источника, выполненного астрофизиками на основе детальных измерений; в других случаях нами были проанализированы наблюдаемые характеристики объекта и получены приближенные оценки. Для ускорения в непосредственной окрестности центральной черной дыры активной галактики мы получили простую оценку сверху на максимальную энергию как функцию массы черной дыры, поскольку с этой массой связан как размер ускоряющей полевой конфигурации, так и магнитное поле. На основе оценок магнитного поля в разделе 1.3 построена обновленная с учетом последних астрономических данных и обобщенная с учетом потерь на излучение в разных режимах диаграмма Хилласа, с помощью которой определены классы возможных астрофизических ускорителей



(см. Рис. 2).

Показано, что лишь самые мощные активные галактики (радиогалактики, квазары и лацертиды) способны ускорить протоны до энергий порядка  $10^{20}$  эВ, в то время как заметно более многочисленные и близкие сейфертовские галактики могут ускорять до таких энергий лишь более тяжелые ядра. В согласии с экспериментальными данными, в частности, с результатами раздела 1.3 главы 1, это предопределяет смешанный состав первичных частиц при самых высоких энергиях.

Во втором параграфе главы 2 рассмотрен ряд вопросов, связанных с излучением и наблюдением вторичных нейтрино и фотонов от источников космических лучей. В частности, в разделе 2.1 изучается вопрос об оптической толщине различных областей активных галактик для фотонов сверхвысоких энергий и показывается, что области таких галактик с характерным размером больше килопарсека (струи, радиоуши, горячие пятна и т.д.) прозрачны для таких фотонов. Это, в частности, означает, что они не могут обеспечить поглощение вторичных фотонов, требуемое в сценариях с высокими потоками космических лучей в источнике (например, в модели  $Z$ -вспышек). Вместе с тем центральные области активных галактик могут быть оптически толстыми, однако требуемые для сценария  $Z$ -вспышек условия все равно не выполняются, поскольку потоки вторичных нейтрино, покидающих источник, противоречат экспериментальным ограничениям. В разделе 2.2 продемонстрировано, что в ряде случаев должно формироваться протяженное изображение источника космических лучей в гамма-диапазоне, и предложен метод наблюдения такого изображения, размер которого меньше углового разрешения телескопа, во время покрытия источника Солнцем.

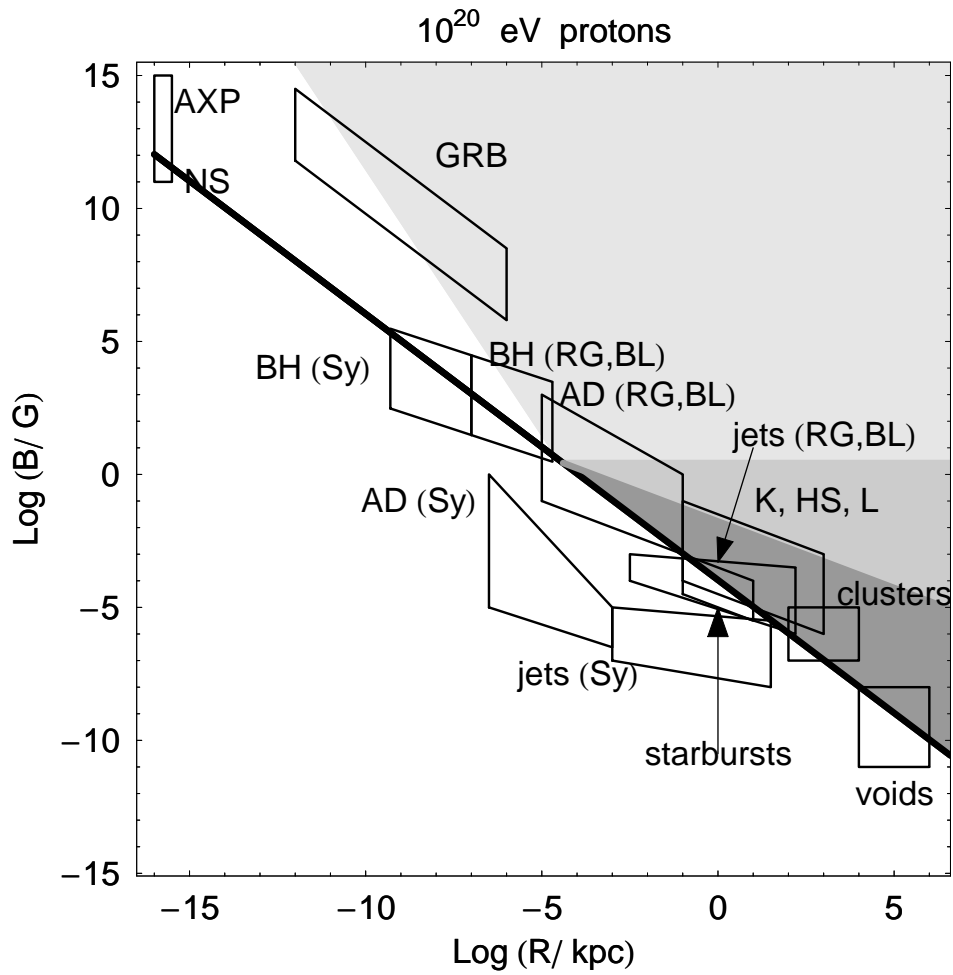


Рис. 2. Диаграмма Хилласа с ограничениями из геометрии и потерь на излучение для ускорителей протонов энергии  $10^{20}$  эВ. Жирная линия: нижняя граница области параметров, разрешенной критерием Хилласа. Закрашенные области разрешены также и ограничениями из радиационных потерь: светло-серая – лишь для индуктивного ускорения с изгибными потерями; серая – также для индуктивного ускорения с синхротронными потерями; темно-серая – как для индуктивного, так и для диффузного ускорения. Обозначены области, соответствующие отдельным классам объектов: непосредственным окрестностям нейтронных звезд (NS), аномальных рентгеновских пульсаров и магнетаров (AXP), сверхмассивных центральных черных дыр (BH) и центральных парсеков (AD) активных галактик – от маломощных сейфертовских (Sy) до мощных радиогалактик (RG) и блазаров (BL); релятивистским струям (jets), узелкам (K), горячим пятнам (HS) и радиоушам (L) мощных активных галактик (RG и BL); нерелятивистским выбросам маломощных активных галактик (Sy); галактикам с интенсивным звездообразованием (starburst); гамма-всплескам (GRB); скоплениям галактик (clusters) и крупномасштабным пустотам (voids).

Параграф 3 главы 2 посвящен глобальной анизотропии направлений прихода космических лучей, в первую очередь от астрофизических источников. В разделе 3.1 рассматривается гипотеза, согласно которой распределение источников космических лучей сверхвысоких энергий повторяет распределение материи во Вселенной. Поскольку область, откуда до наблюдателя могут долетать частицы самых высоких энергий, ограничена размером, небольшим по сравнению с масштабом, на котором Вселенная становится однородной, анизотропия распределения материи в этой области должна найти свое отражение в направлениях прихода космических лучей. На основании однородных выборок галактик из базы данных LEDA и из каталога протяженных источников (XSC) обзора неба 2MASS нами была построена функция, описывающая усредненное распределение материи на расстояниях до 270 Мпк от нашей Галактики. Учет распространения частиц сверхвысоких энергий в космическом фоновом излучении позволил получить из этого трехмерного распределения плотности источников двумерную картину распределения направлений прихода на небесной сфере, ожидаемую для астрофизического сценария с большим (сотни в пределах сферы ГЗК) числом источников (см. Рис. 3). Ожидаемая картина анизотропии для альтернативного сценария, в котором космические частицы сверхвысоких энергий рождаются в распадах темной материи, обсуждается в разделе 3.2. Наилучшими инструментами для поиска глобальной анизотропии направлений прихода станут будущие космические детекторы. Разработке конкретных методов поиска анизотропии с помощью таких детекторов, в первую очередь с небольшой статистикой и плохим угловым разрешением, в частности пионерского отечественного проекта ТУС, посвящен раздел 3.3. В разделе

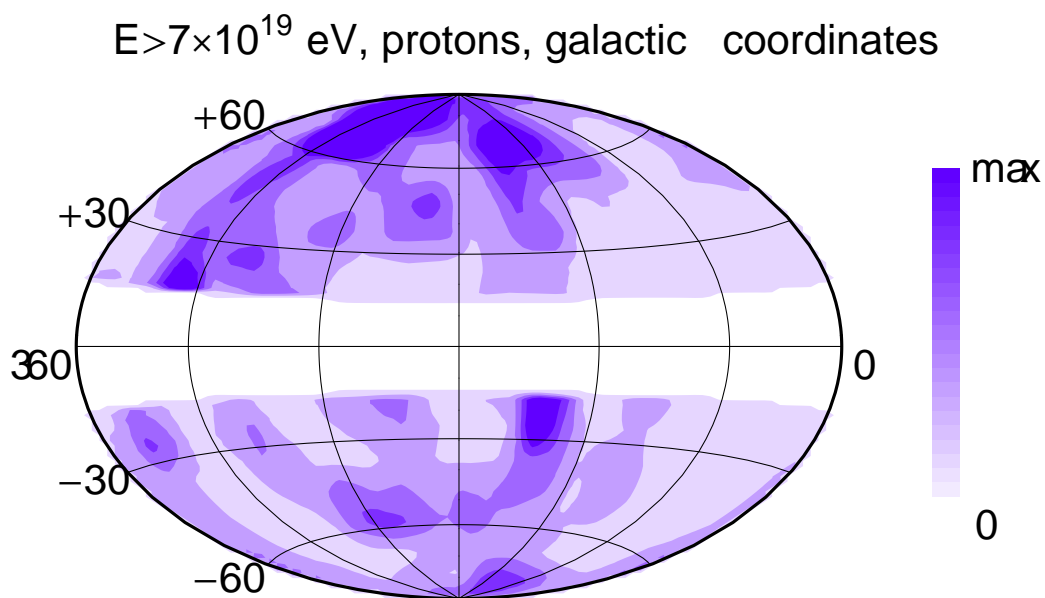


Рис. 3. Ожидаемая плотность числа событий с  $E > 7 \times 10^{19}$  эВ от внегалактических источников протонов, изображенная на карте неба в галактических координатах для изотропной экспозиции. Темные области соответствуют более высокой плотности (в линейном масштабе). Белая полоса – зона избегания галактик,  $|b| < 15^\circ$ , вырезанная из исходной выборки.

ле 3.4 обсуждается глобальная анизотропия при самых высоких энергиях в данных наземных экспериментов; отмечается, что астрофизические сценарии с большим числом источников не поддерживаются современными данными, но число событий при таких энергиях недостаточно для надежных выводов. С другой стороны, в данных прошлых экспериментов имеются указания на анизотропию направлений прихода событий с энергиями свыше  $10^{20}$  эВ, не зарегистрированных из большой области неба в районе Северного полюса.

В параграфе 4 главы 2 обсуждаются перспективные с точки зрения поиска конкретных астрофизических источников направления на небе – кластеры событий, зарегистрированных экспериментом AGASA и Якутской установкой. Учет поправки на отклонение заряженных частиц в магнитном поле Галактики приводит к размыванию эффекта кластеризации, что может свидетельствовать о случайном происхождении кластеров, о несправедливости моделей магнитного поля или о наличии нейтральных частиц. В качестве иллюстрации трудностей поиска источников индивидуальных событий предпринята попытка выделить возможные источники для наиболее интересного кластера, состоящего из трех событий AGASA, одного события HiRes и одного – зарегистрированного Якутской установкой; в результате делается вывод о необходимости применения статистических методов поиска источников.

Такие статистические методы рассматриваются в главе 3, посвященной корреляциям направлений прихода космических лучей с положениями источников определенных классов. В параграфе 1 описывается метод корреляционного анализа и обсуждаются некоторые тонкие моменты его применения (раздел 1.1). В качестве примера использования метода

в разделе 1.2 обсуждается поиск источников фотонов с энергиями выше 10 ГэВ, зарегистрированных гамма-телескопом EGRET. Небольшое количество событий не позволяет применить для идентификации этих источников стандартные астрономические методы. Угловое разрешение инструмента при обсуждаемых энергиях заметно лучше, чем у детекторов космических лучей, и сильный корреляционный сигнал однозначно свидетельствует о связи изучаемых фотонов с яркими лацертидами, несмотря на то, что каждому отдельному источнику соответствуют всего один-два фотона.

Во втором параграфе главы 3 проведен сравнительный анализ корреляций положений астрофизических источников различных классов с направлениями прихода частиц, зарегистрированных экспериментами AGASA, HiRes и Якутской установкой. В качестве возможных источников рассматриваются все постоянные внегалактические объекты, упоминавшиеся в литературе в качестве кандидатов на роль ускорителей сверхвысоких энергий. Показано, что корреляции с данными всех трех экспериментов наблюдаются лишь у одного класса объектов – у лацертид. С учетом перебора различных каталогов вероятность этого эффекта в случайных выборках составляет порядка  $5 \times 10^{-5}$ .

В третьем параграфе главы 3 на статистической основе составлен список лацертид – вероятных источников гамма-излучения с энергией выше 100 МэВ и обнаружены корреляции направлений прихода частиц, зарегистрированных AGASA и Якутской установкой, с положениями лацертид из этого списка и неидентифицированных гамма-источников. Корреляционный сигнал усиливается при учете поправки на отклонение заряженных космических частиц магнитным полем нашей Галактики. Наличие

гамма-излучения от удаленных источников космических лучей предсказывается результатами § 2 главы 2, разделов 1.3 и 2.2 главы 4 и рядом других исследований.

В параграфе 4 главы 3 обсуждается гипотеза о происхождении заметной части космических частиц самых высоких энергий в ближайшей радиогалактике *Centaurus A*. Сначала на основе результатов § 1 главы 2 показывается, что внешние радиоуши этой галактики могут ускорять даже легкие ядра до энергий, превышающих  $5 \times 10^{19}$  эВ. Затем проводится корреляционный анализ направлений прихода космических частиц с такими энергиями, зарегистрированных экспериментом Pierre Auger, с единственным источником, Cen A. Хотя надежно определить статистическую значимость полученного результата не представляется возможным, обнаруженные корреляции на угловом масштабе  $\sim 15^\circ \div 20^\circ$  не противоречат обсуждаемой гипотезе, а сам масштаб согласован с угловым размером источника ( $9^\circ$ ) и характерным отклонением легких ядер в галактическом магнитном поле ( $\sim 10^\circ$  для этого направления).

В то время как первые три главы диссертации посвящены построению непротиворечивого описания происхождения основной массы космических лучей сверхвысоких энергий, в главе 4 мы обращаемся к эффектам, затрагивающим малую часть событий, но содержащим указания на новые физические явления и представляющим в связи с этим особый интерес. В § 1 обсуждается один из таких эффектов – нейтральные частицы от удаленных лацертид, – обнаруженный в данных HiRes, а в § 2 предлагается описывающая его теоретическая модель. Именно, в разделе 1.1 мы анализируем данные стереоскопического эксперимента HiRes и обнаруживаем статистически значимые корреляции направ-

лений прихода зарегистрированных им событий с положениями ярких лацертид из выборки, мотивированной предыдущими результатами (см. Рис. 4). Корреляции обнаружены на масштабе, предсказанном из данных об угловом разрешении эксперимента и заметно меньшем характерных отклонений протонов в магнитном поле Галактики, что интерпретируется как наличие нейтральных частиц, происхождение которых связано с лацертидами. Пользуясь тем, что в данном случае не проводилась максимизация сигнала путем подстройки параметров, мы формулируем в разделе 1.2 количественную гипотезу:  $2\%_{-0.5\%}^{+1.5\%}$  событий при энергиях  $E > 10^{19}$  эВ вызваны нейтральными первичными частицами от лацертид. Далее мы оцениваем перспективы проверки этой гипотезы в данных других экспериментов, учитывая поле зрения и угловое разрешение установок. Раздел 1.3 посвящен анализу того, какие подклассы лацертид ответственны за корреляции. Сначала мы конструируем большую выборку объектов, для которых определяем широкополосный спектральный индекс от видимого до рентгеновского диапазона как меру положения синхротронного пика широкополосного распределения энергии, а затем изучаем распределение коррелирующих лацертид по этому индексу и сравниваем его с распределением всех источников в выборке. Результат сравнения методом Колмогорова–Смирнова говорит о том, что основной вклад в корреляции вносят лацертиды с низкоэнергетическим пиком, у которых светимость в видимом диапазоне превышает рентгеновскую. Более того, точно такая же картина наблюдается для лацертид – гамма-источников в диапазоне чувствительности EGRET, что дает дополнительное подтверждение гипотезе о связи гамма-излучения и излучения космических лучей лацертидами.



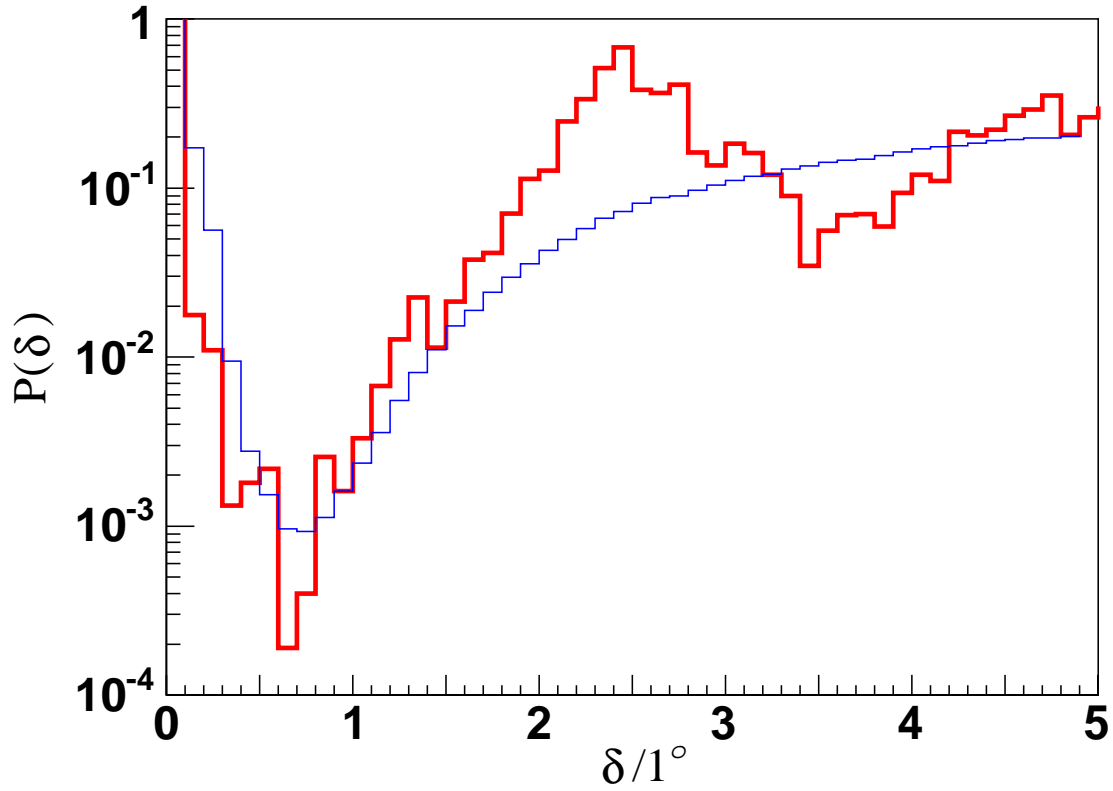


Рис. 4. Вероятность получить в результате случайной флуктуации для изотропного распределения направлений прихода, число пар “источник–событие” с угловым разделением  $\delta$ , большее или равное экспериментально зарегистрированному, для выборки из 156 лацертид с видимой звездной величиной  $V < 18^m$  и набора из 271 события HiRes (стерео) с энергиями выше  $10^{19}$  эВ. Жирная линия соответствует экспериментальным данным, тонкая линия – теоретическое ожидание, полученное из моделирования методом Монте-Карло в предположении 9-и событий от лацертид.

В параграфе 2 главы 4 решается вопрос о теоретическом объяснении наблюдения нейтральных частиц сверхвысоких энергий от удаленных лацертид с помощью предположения о существовании легкой ( $m \lesssim 10^{-7}$  эВ) псевдоскалярной частицы (аксионоподобной частицы), смешивающейся с фотоном во внешнем магнитном поле. В разделе 2.1 описано взаимодействие аксионоподобной частицы с фотоном, определены условия максимального смешивания и выделен, в зависимости от массы и энергии новой частицы, круг астрофизических объектов, где такое смешивание должно иметь место. Имея в виду различные астрофизические приложения, мы также оцениваем полный поток аксионоподобных частиц с энергиями в гамма-диапазоне от астрофизических источников. В разделе 2.2 кратко обсуждаются трудности объяснения наблюдения нейтральных частиц сверхвысоких энергий от лацертид в рамках Стандартной модели элементарных частиц и ее популярных расширений. Затем отмечается, что для интересующих нас параметров максимальное аксион-фотонное смешивание должно происходить как в лацертидах, так и в нашей Галактике, но (для реалистичных оценок магнитного поля) не в межгалактическом пространстве. Это позволяет сформулировать картину, согласно которой из лацертиды выходит аксион-фотонный луч, фотонная компонента которого взаимодействует с фоновым излучением, что приводит к быстрой потере энергии отдельных фотонов в электромагнитном каскаде, поэтому на расстояниях порядка мегапарсек большая часть энергии переходит в фотоны EGRET-диапазона. С учетом того, что расстояние до лацертид составляет сотни мегапарсек, в соответствии с результатами раздела 2.2 главы 2 формируется протяженное изображение источника в гамма-диапазоне. С другой стороны, акси-

онная компонента распространяется в межгалактическом пространстве без взаимодействия, сохраняя сверхвысокие энергии. В нашей Галактике вновь имеет место близкое к максимальному смешивание, в результате которого рождаются фотоны сверхвысоких энергий, направления прихода которых к наблюдателю указывают на лацертиду-источник. Затем формулируются следствия предлагаемого объяснения, проверка которых возможна в будущих экспериментах, и кратко обсуждаются другие астрофизические проблемы, решаемые с помощью того же самого механизма.

В заключении представлены выводы и сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

Некоторые технические детали, относящиеся к различным главам диссертации, собраны в приложениях. Обозначения, используемые при описании метода пособытийного анализа состава первичных частиц, и детали процедуры реконструкции энергии и мюонной плотности экспериментом AGASA и Якутской установкой, приводятся в Приложении А. В Приложении Б описывается построение функции плотности распределения материи во Вселенной по однородным выборкам из каталогов галактик. Приложение В суммирует детали вычисления зависящей от направления экспозиции различных экспериментов. В Приложении Г описаны каталоги объектов, использованные для сравнительного корреляционного анализа.

### **Основные результаты диссертации опубликованы в работах:**

1. D. S. Gorbunov, P. G. Tinyakov, I. I. Tkachev, S. V. Troitsky. Evidence for a connection between gamma-ray and highest-energy cosmic ray emissions by BLLs // – *Astrophys. J.* – 2002. – 577. – P.L93–L96.

2. D. S. Gorbunov, P. G. Tinyakov, S. V. Troitsky. Constraints on ultra-high energy neutrinos from optically thick astrophysical accelerators. // – *Astropart. Phys.* – 2003. – 18. – P.463–470.
3. D. S. Gorbunov, S. V. Troitsky. Declination dependence of the cosmic-ray flux at extreme energies. // – *JCAP.* – 2003. – 0312. – 010.
4. D. S. Gorbunov, P. G. Tinyakov, I. I. Tkachev, S. V. Troitsky. Testing the correlations between ultra-high-energy cosmic rays and BL Lac type objects with HiRes stereoscopic data // – *Письма ЖЭТФ.* – 2004. – 80. – P.167–170.
5. D. S. Gorbunov, P. G. Tinyakov, I. I. Tkachev, S. V. Troitsky. Identification of extragalactic sources of the highest energy EGRET photons by correlation analysis // – *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2005. – 362. – P.L30–L34.
6. D. S. Gorbunov, S. V. Troitsky. A comparative study of correlations between arrival directions of ultra-high-energy cosmic rays and positions of their potential astrophysical sources // – *Astropart. Phys.* – 2005. – 23. – P.175–189.
7. S. V. Troitsky. Magnetic deflections and possible sources of the clustered ultra-high-energy cosmic rays. // – *Astropart. Phys.* – 2006. – 26. – P.325–331.
8. D. S. Gorbunov, P. G. Tinyakov, I. I. Tkachev, S. V. Troitsky. Estimate of the correlation signal between cosmic rays and BL Lacs in future data // – *JCAP.* – 2006. – 0601. – 025.
9. G. I. Rubtsov, L. G. Dedenko, G. F. Fedorova, E. Yu. Fedunin, A. V. Glushkov, D. S. Gorbunov, I. T. Makarov, M. I. Pravdin, T. M. Roganova, I. E. Sleptsov, S. V. Troitsky. Upper limit on the

- ultra-high-energy photon flux from AGASA and Yakutsk data. // – Phys. Rev. – 2006. – D73. – 063009.
10. L. G. Dedenko, G. F. Fedorova, T. M. Roganova, M. I. Pravdin, I. E. Sleptsov, V. A. Kolosov, A. V. Glushkov, D. S. Gorbunov, G. I. Rubtsov, S. V. Troitsky. Possible observations of new physics in ultrahigh-energy cosmic rays. // – Ядерная физика. – 2007. – 70. – C.170–174.
  11. D. S. Gorbunov, G. I. Rubtsov, S. V. Troitsky. Air-shower simulations with and without thinning: Artificial fluctuations and their suppression. // – Phys. Rev. – 2007. – D76. – 043004.
  12. D. S. Gorbunov, G. I. Rubtsov, S. V. Troitsky. Towards event-by-event studies of the ultrahigh-energy cosmic-ray composition. // – Astropart. Phys. – 2007. – 28. – P.28–40.
  13. A. V. Glushkov, D. S. Gorbunov, I. T. Makarov, M. I. Pravdin, G. I. Rubtsov, I. E. Sleptsov, S. V. Troitsky. Constraining the fraction of primary gamma rays at ultra-high energies from the muon data of the Yakutsk extensive-air-shower array // – Письма ЖЭТФ. – 2007. – 85. – C.163–167.
  14. M. Fairbairn, S. Gninenko, N. Krasnikov, V. Matveev, T. Rashba, A. Rubbia, S. Troitsky. Searching for energetic cosmic axions in a laboratory experiment // – Eur. Phys. J. – 2007. – C52. – P.899–904.
  15. A. V. Glushkov, I. T. Makarov, M. I. Pravdin, I. E. Sleptsov, D. S. Gorbunov, G. I. Rubtsov, S. V. Troitsky. Muon content of ultra-high-energy air showers: Yakutsk data versus simulations. // – Письма ЖЭТФ. – 2008. – 87. – C.220–224.

16. O. E. Kalashev, B. A. Khrenov, P. Klimov, S. Sharakin, S. V. Troitsky. Global anisotropy of arrival directions of ultra-high-energy cosmic rays: capabilities of space-based detectors. // – JCAP. – 2008. – 0803. – 003.
17. S. V. Troitsky. Spectral energy distributions and high-energy emission of BL Lac type objects // – Mon. Not. Roy. Astron. Soc. – 2008. – 388. – P.L79–L83.
18. D. S. Gorbunov, P. G. Tinyakov, I. I. Tkachev, S. V. Troitsky On the interpretation of the cosmic-ray anisotropy at ultra-high energies // – Preprint arXiv:0804.1088 [astro-ph]. – 2008.
19. K. Ptitsyna, S. Troitsky. Physical conditions in potential sources of ultra-high-energy cosmic rays. I. Updated Hillas plot and radiation-loss constraints. // – Preprint arXiv:0808.0367 [astro-ph]. – 2008.
20. S. Gureev, S. Troitsky. Physical conditions in potential sources of ultra-high-energy cosmic rays. II. Nearby active galaxies correlated with Auger events. // – Preprint arXiv:0808.0481 [astro-ph]. – 2008.
21. M. Fairbairn, T. Rashba, S. Troitsky. Gamma-ray halo around 3C 279: looking through the Sun on October 8 // – Preprint arXiv:0809.4886 [astro-ph]. – 2008.