

## ОТЗЫВ

официального оппонента Деденко Л.Г. на диссертационную работу  
О.Е. Калашева «Космические лучи ультравысоких и сверхвысоких энергий.  
Сопутствующие нейтринные и фотонные излучения», представленную на со-  
искание ученой степени доктора физико-математических наук по специаль-  
ности 01.04.02 – теоретическая физика

Проблема происхождения космических лучей с энергиями выше  $10^{18}$  эВ является одной из наиболее актуальных, интригующих и сложнейших задач современной теоретической физики и астрофизики частиц. Целями исследований являются как идентификация предполагаемых источников и природы частиц первичного космического излучения (ПКИ) так и определение возможных механизмов ускорения этих частиц или их рождения в процессах распада некоторых гипотетических объектов. Характеристики энергетических спектров инжекции ускоряемых (рожденных в процессах распада?) частиц также представляют интерес. В космическом пространстве, которое представляется заполненным реликтовыми фотонами и фотонами оптического и радио диапазонов и магнитными полями, частицы ПКИ взаимодействуют со всеми ингредиентами в этом пространстве. Фотоны, возникающие в процессах распада нейтральных пи-мезонов, и электроны (позитроны), как и продукты их реакций, также взаимодействуют со всеми ингредиентами космического пространства, образуя электромагнитные каскады (ЭК). В процессах распада заряженных  $\pi$ -мезонов рождаются нейтрино. Таким образом, кроме первичного, на Землю приходят потоки и вторичных, по терминологии соискателя сопутствующих излучений фотонов и нейтрино. Также следует учитывать, что источники могут находиться на очень больших расстояниях от Земли. Поэтому становится необходимым учет их эволюции в изменяющейся Вселенной.

Впервые указание на существование широких атмосферных ливней (ШАЛ) с энергией порядка 100 ЭэВ ( $1 \text{ ЭэВ} = 10^{18} \text{ эВ}$ ), было получено в 1963 г. Д. Линсли в США. Так появились космические лучи ультравысоких энергий

(КЛУВЭ). Эта работа стимулировала строительство новых гигантских по тем временам установок. На Якутской комплексной установке ШАЛ им. Д. Д. Красильникова, эффективная площадь которой в настоящее время составляет  $\sim 10 \text{ км}^2$ , в наземных сцинтилляционных детекторах регистрируются сигналы от потоков гамма-квантов, электронов и мюонов, а в подземных детекторах – от потоков мюонов высокой энергии. В безлунные ночи регистрируется также излучение Вавилова-Черенкова, возникающее в атмосфере от заряженных частиц ливня. В настоящее время используется две техники наблюдений. Это наземные детекторы (баки с водой или сцинтилляторы) и флуоресцентные телескопы (ФТ), которые детектируют ультрафиолетовое излучение возбужденных частицами ШАЛ молекул азота. Крупнейшей установкой в настоящее время является Обсерватория Пьера Оже (Pierre Auger Observatory (PAO)) в Аргентине. Крупнейшая в северном полушарии установка Telescope Array (TA) находится в США. Погрешность оценки энергии первичных частиц в современных экспериментах оценивается примерно в 20%, а погрешности оценок состава ПКИ заметно больше.

На этих установках получены экспериментальные подтверждения уменьшения потока частиц первичного космического излучения при энергиях частиц выше  $5 \cdot 10^{19}$  эВ. Если это уменьшение обусловлено эффектом Грейзена-Зацепина-Кузьмина (ГЗК), то в потоке первичных частиц должны быть фотоны и нейтрино. Для регистрации гамма-квантов от ЭК используются орбитальные установки, крупнейшей из которых был орбитальный гамма-телескоп Fermi LAT, и наземные телескопы, а нейтрино – нейтринные телескопы (Байкальский нейтринный телескоп и Ice Cube на Южном полюсе). В условиях, когда измеряются характеристики первичного и сопутствующих излучений, естественно, возникает чрезвычайно актуальная проблема их согласования. Именно такую задачу поставил перед собой соискатель, используя заметные погрешности и неопределенности в измерениях состава КЛУВЭ и другие проблемы как мотивацию для ее решения. Соискатель определил в качестве целей диссертационной работы рассмотрение проблемы происхождения КЛУВЭ, получение оценок состава

космических лучей и возможной эволюции источников на основе расчетов потоков сопутствующих фотонов и нейтрино. Для достижения поставленных целей соискателем были решены следующие задачи. Определены характеристики электромагнитных каскадов, в различных сценариях рассчитаны возможные потоки фотонов ультравысоких энергий и проведено сравнение с существующими экспериментальными ограничениями, В сценариях с протонным первичным составом вычислены потоки вторичного гамма-излучения и нейтрино и проведены сравнения с оценкой диффузного фона, полученной коллаборацией телескопа Ферми, и с ограничениями на диффузный поток нейтрино с энергиями выше 10 ПэВ согласно данным эксперимента IceCube. Поставлены ограничения на эволюцию и первичный спектр КЛУВЭ. Предложен механизм объяснения кажущейся аномальной прозрачности Вселенной для гамма-излучения от далёких блазаров. Рассмотрены две модели взаимодействия космических лучей со средой источника и получены оценки вторичных сигналов.

Поэтому новизна и актуальность диссертации О.Е. Калашева не вызывают сомнений.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав основного текста, заключения, библиографии, одного приложения и списка сокращений. Она содержит 42 рисунка и 8 таблиц. Общий объем диссертации 187 страниц. Библиография включает 234 наименования.

Содержание диссертации по главам представлено следующим образом. В прекрасно написанном введении сначала рассматриваются главные моменты астрофизики частиц сверхвысоких энергий. Четко обозначены цели и задачи диссертационной работы, приведены положения, выносимые на защиту. Приводится обоснование актуальности работы, ее новизне и возможности практического использования конкретных результатов в различных экспериментальных исследованиях в области астрофизики частиц высоких энергий. Указана структура диссертации, приведено распределение материала по главам.

В первой главе диссертации рассматриваются свойства электромагнитного каскада (ЭК). Достоинством работы является анализ физики ЭК в рам-

ках упрощённой модели, в которой рассматривается статичная Вселенная, заполненная излучением с дихроматическим спектром фотонов с энергиями, примерно соответствующими характерным энергиям реликтового излучения (РИ) и межгалактического фонового света (МФС). Когда развитие каскада завершается, спектр принимает универсальную форму. Эти аналитические расчёты служат ориентирами соискателю при анализе результатов численного моделирования ЭК и их сравнении с результатами независимых вычислений. Из требования об ограничении расчетного потока наблюдаемым соискателем выводится новое ограничение сверху на плотность каскадного излучения, которая оказывается зависящей от модели. Полученные результаты – несомненное достижение соискателя.

Во второй главе соискателем рассматриваются потоки космогенных нейтрино и фотонов с энергией свыше 0.1 ЭэВ, а также диффузное гамма-излучение в диапазоне от МэВ до сотен ГэВ, сопоставление которых с экспериментальными данными позволяют существенно ограничить состав частиц ПКИ. Для получения ограничений соискателем предложен общий метод. В рамках сравнительно простой феноменологической модели, описывающей энергетический спектр, массовый состав и эволюцию источников, определяются значения параметров модели, позволяющие согласовать расчетный и наблюдаемый энергетические спектры КЛУВЭ. Затем в рамках моделей с определенными параметрами вычисляются спектры сопутствующих излучений, которые сравниваются с экспериментальными данными. Соискателем показано, что самые сильные ограничения на долю протонов, а также спектр и эволюцию источников получаются из сопоставления предсказаний спектра диффузного гамма-излучения с результатами наблюдений орбитального эксперимента Fermi LAT, а также в некоторых случаях из сравнения спектров космогенных нейтрино с экспериментальным пределом, полученном на установке Ice Cube. Соискатель делает вывод, что эффективно исключаются экзотические модели "top-down", а также астрофизические сценарии с экстремально высокой максимальной энергией ускорения. Общий вывод соискателя состоит в том,

что модели с составом из протонов практически исключаются из-за высокого предсказываемого вклада в поток диффузного гамма-излучения, а также в поток нейтрино с энергией выше 10 ПэВ.

Центральной темой третьей главы является проблема аномальной видимой прозрачности Вселенной для гамма-излучения в области энергий выше сотен ГэВ от далеких блазаров. В диссертации предложен альтернативный гипотетическим сценариям механизм, основанный на предположении о том, что блазары также являются источниками космических лучей сверхвысоких энергий. Протоны, испущенные блазарами, взаимодействуют с реликтовым излучением и с фотонами межгалактического фонового света, подпитывая электромагнитные каскады. Численные оценки сравниваются с результатами аналитического решения дифференциального уравнения, которое описывает зависимость потока первичных и вторичных гамма-лучей от расстояния до источника. Соискателем получена также оценка возможного вклада данного механизма в суммарный поток нейтрино с энергиями порядка ПэВ, наблюдаемый в эксперименте Ice Cube. Ограничение сверху на абсолютную величину потока нейтрино получается на основе результатов измерения спектра протонов в эксперименте KASCADE Grande. Соискателем показано, что с помощью наземных атмосферных черенковских телескопов следующего поколения, таких как Cherenkov Telescope Array (CTA), можно будет увидеть значительно большее число далёких блазаров чем ожидалось.

В четвертой главе соискатель рассматривает случай взаимодействий частиц ПКИ с анизотропным излучением аккреционного диска в модели Шакуры-Сюняева. Расчёт наблюдаемых спектров проводится в два этапа. Сначала с помощью метода Монте Карло рассчитывается спектр нуклонов, фотонов и нейтрино, покидающих источник. Затем результат используется в качестве эффективного спектра инжекции в стандартной задаче с экстрагалактическими источниками, которая решается с использованием численного кода, разработанного соискателем. Поток нейтрино нормируется с помощью данных коллаборации Ice Cube. При этом поток вторичного каскадного гамма-излучения не противоречит результатам измерений

диффузного гамма-излучения, Соискатель рассматривает также взаимодействия космических лучей с газом вблизи активных ядер галактик Фонарев-Райли I (ФР I) и Лацертид. Результаты вычислений соискателя показывают, что поток фотонов от популяции Лацертид и ФР I может полностью объяснить экстрагалактический поток гамма-лучей. Однако, требуется дополнительный поток нейтрино, возможно, галактических, чтобы полностью объяснить сигнал от нейтрино в Ice Cube.

В Заключении перечислены главные идеи работы соискателя.

Относительно диссертационной работы О.Е. Калашева можно сделать следующие замечания. Во-первых, как один из побудительных мотивов соискатель указывает на заметные погрешности измерений состава КЛУВЭ. Погрешности, действительно, велики. Однако, необходимость работы, подобной выполненной соискателем, остается и в случае, когда состав и спектры ПКИ известны. В этом случае стоит задача определения всех ингредиентов космической среды, как в рентгеновских исследованиях. Второе замечание относится к использованию соискателем данных Обсерватории Пьера Оже. Представляется, что критерии отбора ливней в этой Обсерватории слишком формализованы. Игнорируются ливни с высоким или слишком низким положением его максимума, реализуется некоторая выборка. Игнорируются также ливни, у которых прекрасные данные по флуоресцентному свету, но отсутствует часть показаний водяных баков. Например, игнорируется ливень с энергией  $2 \cdot 10^{20}$  эВ. Далее, модели, с помощью которых определяется состав, содержат погрешности в спектрах генерации вторичных частиц самых высоких энергий, что приводит к ошибке в определении положения максимума. К сожалению, в диссертационной работе встречаются опечатки и описки. Однако, сделанные выше замечания, не могут повлиять на высокую оценку диссертационной работы О.Е. Калашева.

Диссертация основана на работах, выполненных соискателем в Отделе теоретической физики ИЯИ РАН в 2003-2016 гг. Все результаты диссертации являются обоснованными. Основные результаты диссертации О.Е. Калашева

опубликованы в 23 работах, в том числе в 16 статьях в рецензируемых высокорейтинговых международных журналах и российских научных изданиях, и в 7 статьях в сборниках трудов конференций, неоднократно докладывались лично соискателем на международных и всероссийских конференциях и семинарах. Основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованных работах. Работа соискателя была поддержана грантами РФФИ, Президента РФ для молодых кандидатов наук, Минобрнауки РФ и РНФ, программой Президиума РАН. Следует отметить, что соискатель успешно работал в многочисленных научных командировках в Научный институт и лабораторию Гран Сассо в Италии, Институт Макса Планка в Мюнхене, Свободный Университет Брюсселя, Институт исследований космических лучей Университета Токио, Университет Калифорнии в Лос-Анжелесе, Центр Физики в Аспене, Университет Юты в США. Во время работы соискателя в ИЯИ РАН и в зарубежных лабораториях в обсуждении отдельных частей работы соискателя принимали участие известные во всем мире и молодые отечественные и зарубежные физики М.В. Либанов, Дж.Н. Мэтьюз, Э.Я. Нугаев, М.С. Пширков, В.А. Рубаков, Х. Сагава, П.С. Сатунин, С.М. Сибиряков, Е.В. Соколова, П. Сокольский, Б.Т. Стокс, П.Г. Тиняков, Ф. Урбан, М. Фукушима. О.Е. Калашев - член международного коллектива коллаборации Telescope Array.

Диссертационная работа Калашева Олега Евгеньевича «Космические лучи ультравысоких и сверхвысоких энергий. Сопутствующие нейтринные и фотонные излучения» выполнена на высоком научном уровне, представляет собой законченную научно-квалификационную работу и удовлетворяет всем критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор, Калашев Олег Евгеньевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Автореферат диссертации полностью соответствует ее полному тексту.

Результаты диссертации могут быть использованы в ИЯИ РАН, НИИЯФ МГУ имени М.В. Ломоносова, НИЯУ МИФИ, ОИЯИ, Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН, ИТЭФ, ПИЯФ и в других отечественных и зарубежных институтах и лабораториях.

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики физического факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, профессор

/Деденко Леонид Григорьевич/

27 января 2017 г.

Адрес: 119991, Москва, Ленинские Горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, дом 1, строение 2, физический факультет,

Тел. 8-495-939-14-89

e-mail: [ddn@dec1.sinp.msu.ru](mailto:ddn@dec1.sinp.msu.ru)

Подпись проф. Л.Г. Деденко удостоверяю:

Декан физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,  
профессор

/Н.Н. Сысоев/

# Деденко Леонид Григорьевич

доктор физико-математических наук, профессор

специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц

## Основные публикации по теме диссертации за последние 5 лет

1. **“Constraints of hadronic interaction models from the cosmic muon observations”**  
L. G. Dedenko, A. V. Lukyashin, G. F. Fedorova and T. M. Roganova.  
arXiv:1504.05853 [astro-ph.HE]  
DOI:10.1051/epjconf/20159910003  
EPJ Web Conf. **99**, 10003 (2015)
2. **“Тестовые эксперименты по мюонной радиографии в России на основе эмульсионных трековых детекторов”**  
А. Б. Александров, В. И. Галкин, Л. Г. Деденко *и др.*  
Письма в журнал “Физика элементарных частиц и атомного ядра” **12**, № 5, 196 (2015).
3. **“Testing model energy spectra of charged particles produced in hadron interactions on the basis of atmospheric muons”**  
L. G. Dedenko, T. M. Roganova and G. F. Fedorova.  
DOI:10.1134/S1063778815060083  
Phys. Atom. Nucl. **78**, no. 7, 840 (2015), [Yad. Fiz. **78**, no. 10, 894 (2015)].
4. **“Prospects of the study of geological structures by muon radiography based on emulsion track detectors”**  
L. G. Dedenko *et al.*  
DOI:10.3103/S1068335614080065  
Bull. Lebedev Phys. Inst. **41**, no. 8, 235 (2014).
5. **“Test of hadron interaction models in the most important energy range of secondary particles in spectra of atmospheric muons”**  
L. G. Dedenko, T. M. Roganova and G. F. Fedorova.  
DOI:10.1134/S002136401416005X  
JETP Lett. **100**, no. 4, 223 (2014), [Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. **100**, no. 4, 247 (2014)].
6. **“Possible composition of the primary particles at ultrahigh energies observed at the Yakutsk array”**  
L. G. Dedenko *et al.*  
J. Phys. Conf. Series **409**, no. 1, 2068-2071 (2013).
7. **“Units of signals in the surface and underground scintillation detectors of the Yakutsk array”**  
L. G. Dedenko, Fedorova G. F., Roganova T. M.  
J. Phys. Conf. Series **409**, no. 1, 2093-2096 (2013).
8. **“The composition of the primary particles at energies  $3 \times 10^{17} - 3 \times 10^{19}$  eV observed at the Yakutsk array”**  
L. G. Dedenko *et al.*  
DOI:10.1088/0954-3899/39/9/095202  
J. Phys. G **39**, 095202 (2012).