

УТВЕРЖДАЮ:

Вр.и.о. директора ИКФИА СО РАН
д.ф.-м.н. С.А. Стародубцев

М.П.

18 января 2017 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации - Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космофизических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера Сибирского Отделения Российской Академии Наук (ИКФИА СО РАН) на диссертацию **Олега Евгеньевича Калашева** «Космические лучи ультравысоких и сверхвысоких энергий. Сопутствующие нейтринные и фотонные излучения», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 - теоретическая физика.

Диссертация О.Е. Калашева посвящена проблеме происхождения космических лучей (КЛ) сверхвысоких энергий, изучению массового состава первичных КЛ и возможной эволюции источников. При этом систематически используется подход, основанный на подсчёте сопутствующих потоков фотонов и нейтрино, произведённых при распространении КЛ в межгалактическом пространстве, либо в непосредственной близости к источникам.

Актуальность темы исследований обусловлена тем, что проблема происхождения КЛ сверхвысоких энергий является одной из наиболее актуальных и сложных задач современной астрофизики космических лучей. Экспериментальные исследования в данной области сильно осложнены из-за малости потока частиц указанных энергий, порядка 1 частицы на квадратный километр на стерадиан в год при энергии 10^{19} эВ. По этой причине во всех существующих экспериментах свойства таких частиц определяются косвенным образом - по характеристикам широких атмосферных ливней (ШАЛ), инициированных космическими лучами в атмосфере Земли.

В условиях, когда массовый состав не удаётся достоверно измерить, а интерпретация направлений прихода неочевидна, особую значимость приобретает альтернативный подход, основанный на изучении сопутствующих сигналов от взаимодействия КЛ сверхвысоких энергий со средой вокруг источника и межгалактической средой на их пути к наблюдателю. Данный подход, развитый в диссертации, позволяет получить независимые ограничения на массовый состав и указать на вероятные источники КЛ.

Оценка содержания диссертации и ее завершенности. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, библиографии, одного приложения и списка сокращений.

Во введении даны общие сведения о процессе распространения КЛ сверхвысоких энергий в межгалактическом пространстве, обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель исследований, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе рассмотрена физика электромагнитного каскада в межгалактической среде, и вычислен спектр фотонов, используя как аналитический, так и численные методы.

Во второй главе изучены сопутствующие сигналы от распространения КЛ - три вида вторичных сигналов: космогенные фотоны и нейтрино сверхвысоких энергий, а также диффузное гамма-излучение в диапазоне от МэВ до сотен ГэВ. Поток вторичных каскадных гамма-лучей во многих случаях оказывается выше потока изотропного гамма-излучения, наблюдаемого телескопом Ферми при энергиях свыше нескольких сотен ГэВ. Поток нейтрино сверхвысоких энергий, вычисленный в существующих сценариях, может быть выше или ниже современных ограничений, следующих из ненаблюдения частиц при энергиях выше 10 ПэВ. Ограничения из данных IceCube получены с использованием экспозиции эксперимента за 7 лет наблюдений. Существующие экспериментальные лимиты на долю фотонов в КЛ пока позволяют эффективно исключать лишь экзотические сценарии происхождения КЛ сверхвысоких энергий (модели "Top-Down", а также астрофизические сценарии с экстремально высокой максимальной энергией ускорения).

В третьей главе обсуждается проблема аномальной видимой прозрачности Вселенной для гамма-излучения с энергией свыше нескольких сот ГэВ от далёких блазаров. Предлагается альтернативная интерпретация, основанная на предположении о том, что наблюдаемые удалённые блазары также являются источниками КЛ сверхвысоких энергий. Протоны, испущенные блазарами, могут взаимодействовать с реликтовым излучением и межгалактическим фоном, рождая электрон-позитронные пары и пи-мезоны. Оба процесса инициируют электромагнитные каскады, равномерно распределенные по линии наблюдения. При этом гамма-лучи более высоких энергий производятся относительно близко к наблюдателю, так что поглощение на фотонах для них не играет большой роли.

В четвёртой главе на примере активных ядер галактик рассматриваются возможные сигналы от взаимодействия КЛ со средой вблизи источников. При этом предполагается что $\nu\gamma$ взаимодействиями можно пренебречь. Такая ситуация может реализовываться вблизи чёрных дыр, в случае радиационно неэффективной аккреции. В качестве вероятных источников в разделе рассматриваются радиогалактики с активным ядром Фонарев-Райли I, в частности, Лацертиды. В рамках данной модели, вторичный сигнал фотонов и нейтрино обязан своим происхождением взаимодействию КЛ с газом вблизи активных ядер галактик Фонарев-Райли I, или Лацертид. Предсказываемый в модели поток нейтрино может составлять до 60% от наблюдаемого в эксперименте IceCube.

В заключении подведены основные результаты работы.

Содержание диссертации обладает внутренним единством, отражает научные результаты и положения, выносимые на защиту, свидетельствует о личном вкладе автора в завершённую в целом работу.

Научная новизна и практическая ценность. Автором впервые получены сильные ограничения на модели происхождения КЛ сверхвысоких энергий, предполагающие первичный протонный состав. Предложен новый механизм объяснения аномальной прозрачности Вселенной для гамма-излучения от далёких блазаров с энергией свыше сотен ГэВ. Ограничение на плотность энергии каскадного излучения является самым сильным и впервые получено с учётом возможной эволюции источников. Взаимодействие КЛ с излучением аккреционного диска чёрной дыры впервые рассмотрено в реалистичной модели, учитывающей анизотропность излучения диска. Предложена оригинальная самосогласованная модель, одновременно объясняющая внегалактический поток гамма-излучения при энергиях свыше ГэВ и обеспечивающая протонную часть потока КЛ сверхвысоких энергий.

Полученные универсальные ограничения на плотность энергии каскадного излучения помимо физики КЛ могут применяться в различных задачах физики элементарных частиц и астрофизики высоких энергий, в частности, в моделях распадающейся тёмной материи.

Вычисление вторичного сигнала от взаимодействий КЛ сверхвысоких энергий с межгалактическим фоном позволило получить ограничения на модели их происхождения с

первичным протонным составом. Данный результат дополняет исследования массового состава, основанные на изучении характеристик ШАЛ.

Модель, объясняющая видимую аномальную прозрачность Вселенной для гамма-излучения высоких энергий, экспериментально проверяема и позволяет выработать рекомендации для проектируемых атмосферных черенковских телескопов следующего поколения, таких как СТА. Подтверждение или опровержение модели позволит одновременно улучшить ограничения на величину межгалактического магнитного поля, что в свою очередь будет иметь последствия для физики КЛ сверхвысоких энергий и гамма-астрономии.

Модели взаимодействия КЛ в источнике доказывают возможность генерации потока астрофизических нейтрино в активных ядрах галактик и указывают на возможную связь источников гамма-излучения и нейтрино сверхвысоких энергий.

Значимость полученных автором диссертации результатов вытекает из положений, выносимых на защиту:

1. Изучены общие свойства электромагнитных каскадов, инициированных частицами сверхвысоких энергий. Отдельно рассмотрен аналитический подход к вычислению спектра каскадного излучения и обсуждены границы его применимости. С помощью данных орбитального эксперимента Ферми, получено универсальное модельно-независимое ограничение на максимальную плотность энергии каскадного излучения.
2. В ускорительных сценариях и в моделях "Top-Down" (распад частиц сверхтяжёлой тёмной материи и топологических дефектов) вычислен диапазон возможных потоков фотонов сверхвысоких энергий. В случае сверхтяжёлой тёмной материи, как основного источника космических лучей выше порога Грейзена-Зацепина-Кузьмина, продемонстрировано, что предсказания теории входят в противоречие с ограничениями на долю фотонов в КЛ.
3. В ускорительных сценариях образования КЛ сверхвысоких энергий, предполагающих преимущественно протонный первичный состав, вычислен поток вторичного гамма-излучения и нейтрино от взаимодействия КЛ с межгалактическим фотонным фоном. Проведено сравнение предсказаний с оценкой диффузного фона из наблюдений орбитального телескопа Ферми, а также с ограничениями эксперимента IceCube на диффузный поток нейтрино выше 10 ПэВ. В результате исключены сценарии с сильной эволюцией и жёстким первичным спектром
4. Предложен механизм объяснения аномальной прозрачности Вселенной для гамма-излучения от далёких блазаров с энергией свыше сотен ГэВ. В его основе лежит предположение о дополнительном вкладе вторичного каскадного излучения от взаимодействия КЛ, испущенных блазарами, с межгалактическим фотонным фоном. В данном сценарии произведена оценка возможного вклада взаимодействий в поток астрофизических нейтрино, а также получены предсказания наблюдаемого числа блазаров в планируемых атмосферных черенковских гамма-телескопах следующего поколения, таких как СТА.
5. Предложена реалистичная модель, описывающая наблюдаемый в эксперименте IceCube, в диапазоне энергий $E > 30$ ТэВ, поток нейтрино $\nu\gamma$ -взаимодействиями КЛ сверхвысоких энергий с анизотропным излучением аккреционного диска в активных ядрах галактик. Показано, что сопутствующие потоки протонов и гамма-излучения, в данной модели, существенно ниже наблюдаемых экспериментально.
6. Предложена самосогласованная модель, одновременно объясняющая наблюдаемый в орбитальном эксперименте Ферми внегалактический поток γ -излучения при энергиях свыше ГэВ и обеспечивающая протонную часть потока КЛ сверхвысоких энергий, предсказанную в независимой работе из анализа данных обсерватории им. Пьера Оже, KASCADE и KASCADE-Grande. В рамках данной модели, вторичный сигнал фотонов и нейтрино обязан своим происхождением взаимодействию КЛ с газом вблизи активных

ядер галактик Фонарев-Райли I или Лацертид. Предсказываемый в модели поток нейтрино может составлять до 60% от наблюдаемого в эксперименте IceCube.

Обоснованность и достоверность выводов и заключений. Основные результаты диссертации являются обоснованными и прошли независимую научную экспертизу, что подтверждается их публикацией в отечественных и зарубежных рецензируемых журналах, а также их апробацией в виде докладов автора на целом ряде престижных российских и международных научных мероприятий.

Ограничения на модели с протонным первичным составом и сценарии "Top-Down" согласуются с результатами других авторов, полученными позже. Модель, объясняющая аномальную прозрачность Вселенной по отношению к гамма-излучению высоких энергий получила широкую известность и активно обсуждается в научном сообществе. Пакет программ для моделирования взаимодействий КЛ сверхвысоких энергий, разработанный автором, опубликован, а результаты расчётов неоднократно сравнивались с независимыми вычислениями.

В целом, диссертация О.Е. Калашева представляет собой завершённое исследование актуальной научной проблемы. Работа выполнена на высоком научном уровне, а результаты являются новыми и значимыми, способствующими развитию на качественном уровне отдельного направления исследований в физике КЛ сверхвысоких энергий.

Тем не менее, имеются некоторые замечания к оформлению диссертации и пожелания к дальнейшей работе соискателя.

1. В диссертации используются различные термины для обозначения, по существу, одних и тех же объектов. Например, терминов "ультравысоких" и "сверхвысоких" энергий, вынесенных даже в название диссертации, хотя на наш взгляд, это синонимы. То же относится к терминам "внегалактический" и "экстрагалактический".
2. По всему тексту диссертации встречаются введенные автором различные аббревиатуры, например, КЛУВЭ, РИ, МФС, ЭК и др., которые не являются широко распространенными, и частое употребление которых затрудняет понимание смысла фраз.
3. Из анализа в четвертой главе возможных сигналов от взаимодействия КЛ со средой вблизи удаленных источников на примере активных ядер галактик остается неясным, как и насколько влияет на долю и распределение фотонов и нейтрино от далеких источников в потоке КЛ сверхвысоких энергий наличие ненулевой космологической постоянной ($\Lambda > 0$) в уравнениях Эйнштейна? Другими словами, насколько велико влияние темной энергии, приводящей к убыстряющейся эволюции источников, плотности вещества и фотонов на космологических расстояниях-времени, на эти компоненты КЛ?
4. Не обошлось в диссертации без опечаток. Так, на страницах 83 и 106 приведены иллюстрации, включающие ссылку на левую-правую панель рисунков. На самом деле это – верхняя и нижняя панели. На Рис. 4.2, 4.3, 4.5, 4.6, розовая и красная кривые плохо различимы, лучше было применить обозначение кривых разными пунктирами.
5. Учитывая поглощение фотонов на космологических расстояниях межгалактическим фоном, представляется желательным в дальнейшей работе диссертанта уделить больше внимания вероятным источникам в нашей собственной Галактике и в местном сверхскоплении, где имеются разнообразные экзотические объекты, предположительно генерирующие КЛ сверхвысоких энергий и сопутствующие им фотоны и нейтрино. Это может позволить получить результаты, которые можно проверить экспериментально, используя данные установок ШАЛ - РАО, TALE и Якутска, изучающих КЛ в области сверхвысоких энергий.

Однако, высказанные замечания и пожелания не затрагивают существа полученных автором результатов и не снижают высокой оценки работы.

Автореферат соответствует содержанию и основным положениям диссертации. Диссертация написана ясным, доступным языком, добротна оформлена, основные результаты опубликованы в рецензируемых статьях автора и хорошо известны российской и мировой научной общественности.

Таким образом, диссертация О.Е. Калашева «Космические лучи ультравысоких и сверхвысоких энергий. Сопутствующие нейтринные и фотонные излучения» соответствует всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, установленным в «Положении о присуждении ученых степеней», утверждённом постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, а сам Олег Евгеньевич Калашев, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании Ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН 16 января 2017 г., протокол № 1.

Отзыв составил

Ведущий научный сотрудник лаборатории ШАЛ ИКФИА СО РАН, д.ф.-м.н.

А.А. Иванов

Председатель Ученого совета ИКФИА СО РАН, д.ф.-м.н.

С.А. Стародубцев

Секретарь Ученого совета ИКФИА СО РАН, к.ф.-м.н.

Е.Д. Бондарь

Почтовый адрес:

677980, г. Якутск, пр. Ленина, д.31, ИКФИА СО РАН

Телефон: +7(4112)390-400

Факс 7 (4112) 390-450

e-mail: ikfia@ysn.ru

Институт космофизических исследований и аэронавтики им.
Ю.Г. Шафера СО РАН

Основные публикации по теме диссертации за последние 5 лет

1. **“Radio signals from extensive air showers with the energies $E_0 \geq 10^{19}$ eV according to data from the Yakutsk extensive air shower array”**
S. P. Knurenko and I. S. Petrov.
DOI:10.1134/S0021364016170100
JETP Lett. **104**, no. 5, 297 (2016), [Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. **104**, no. 5, 306 (2016)].
2. **“Temporal signatures of the Cherenkov light induced by extensive air showers of cosmic rays detected with the Yakutsk array”**
A. A. Ivanov and L. V. Timofeev.
arXiv:1604.05088 [astro-ph.IM]
DOI:10.1142/S0218271816500905
Int. J. Mod. Phys. D **25**, no. 10, 1650090 (2016)
3. **“Testing for uniformity of Ultra-High Energy Cosmic Ray arrival directions”**
A. A. Ivanov.
arXiv:1602.08814 [astro-ph.HE]
DOI:10.1142/S0218271816500656
Int. J. Mod. Phys. D **25**, no. 06, 1650065 (2016)
4. **“A minimal width of the arrival direction distribution of ultra-high-energy cosmic rays detected with the Yakutsk array”**
A. A. Ivanov.
arXiv:1502.07496 [astro-ph.HE]
DOI:10.1088/0004-637X/804/2/122
Astrophys. J. **804**, no. 2, 122 (2015)
5. **“Composition of cosmic rays at ultra high energies”**
E. G. Berezhko, S. P. Knurenko and L. T. Ksenofontov.
DOI:10.1016/j.astropartphys.2012.04.014
Astropart. Phys. **36**, 31 (2012).
6. **“Determination of the cascade-curve maximum depth from the muon component on the Yakutsk EAS array”**
A. V. Glushkov and A. V. Saburov.
DOI:10.1134/S1063776114110065
J. Exp. Theor. Phys. **119**, no. 5, 848 (2014).
7. **“Mass composition of cosmic rays with energies $E_0 \geq 10^{17}$ eV according to the data from the ground-based detectors of the Yakutsk EAS array”**
A. V. Glushkov and A. V. Saburov.
arXiv:1411.5088 [astro-ph.HE]
DOI:10.1134/S0021364014230052
JETP Lett. **100**, no. 11, 695 (2015), [Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. **100**, no. 11, 793 (2014)]
8. **“Revision of the energy calibration of the Yakutsk extensive air shower array”**
A. V. Glushkov, M. I. Pravdin and A. Saburov.

arXiv:1408.6302 [astro-ph.HE]
DOI:10.1103/PhysRevD.90.012005
Phys. Rev. D **90**, no. 1, 012005 (2014)

9. **“Large-scale distribution of cosmic rays in right ascension as observed by the Yakutsk array at energies above 10^{18} eV”**
A. A. Ivanov, A. D. Krasilnikov, M. I. Pravdin and A. V. Sabourov.
arXiv:1407.1583 [astro-ph.HE]
DOI:10.1016/j.astropartphys.2014.07.002
Astropart. Phys. **62**, 1 (2015)
10. **“Reestimation of the energy of extensive air showers at the Yakutsk EAS array with the CORSIKA package”**
A. V. Glushkov, M. I. Pravdin and A. V. Saburov.
DOI:10.1134/S0021364014080086
JETP Lett. **99**, 431 (2014).
11. **“Wide field of view Cherenkov telescope to detect cosmic rays in coincidence with surface detectors of the extensive air shower array”**
A. A. Ivanov *et al.*.
arXiv:1404.6595 [astro-ph.IM]
DOI:10.1016/j.nima.2014.10.029
Nucl. Instrum. Meth. A **772**, 34 (2015)
12. **“Mass content of ultrahigh-energy cosmic rays within different time periods”**
A. V. Glushkov.
DOI:10.1134/S1063778814020069
Phys. Atom. Nucl. **77**, 330 (2014), [Yad. Fiz. **77**, 354 (2014)].
13. **“Variable composition of cosmic rays with $E_0 \geq 10^{17}$ eV according to the data from the muon detectors of the Yakutsk EAS array”**
A. V. Glushkov and A. V. Saburov.
DOI:10.1134/S0021364013230057
JETP Lett. **98**, 589 (2014), [Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. **98**, 661 (2013)].
14. **“Estimate of the mass composition of cosmic rays with $E_0 \leq 10^{18}$ eV according to the data from a new muon detector at the Yakutsk EAS array”**
A. V. Glushkov and A. V. Saburov.
DOI:10.1134/S0021364013080080
JETP Lett. **97**, 444 (2013), [Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. **97**, 514 (2013)].
15. **“A method to search for correlations of ultra-high energy cosmic ray masses with the large scale structures in the local galaxy density field”**
A. A. Ivanov.
arXiv:1212.0600 [astro-ph.IM]
DOI:10.1051/epjconf/20135304010, 10.1088/0004-637X/763/2/112
Astrophys. J. **763**, 112 (2013), [EPJ Web Conf. **53**, 04010 (2013)]