

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе О. Е. Калашева «Космические лучи ультравысоких и сверхвысоких энергий. Сопутствующие нейтринные и фотонные излучения», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Диссертация О. Е. Калашева посвящена актуальным проблемам физики космических лучей с энергиями выше  $10^{18}$  эВ. Основная доля наблюдаемых у Земли частиц с этими энергиями повидимому приходит от внегалактических источников. Вопрос о происхождении частиц самых высоких энергий включая природу их источников, механизмы ускорения и переноса относится к числу наиболее важных проблем физики и астрофизики. В диссертации в основном рассматривается один из аспектов этой проблемы – генерация фотонов и нейтрино, которая сопровождает распространение космических лучей в межгалактической среде и вблизи ядер активных галактик. О. Е. Калашев является специалистом мирового уровня в этой области и автором одной из наиболее полных численных программ для расчета переноса космических лучей.

Представленная докторская диссертация является итогом примерно десяти лет работы её автора. О. Е. Калашев - сотрудник ИЯИ РАН, где получен целый ряд выдающихся научных результатов по физике космических лучей. Этот высокий уровень исследований и творческая атмосфера научного коллектива проявляется в работах автора диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения, списка литературы, одного приложения и списка сокращений. В первой главе рассматриваются свойства электромагнитного каскада, который создается в межгалактической среде превращающемся друг в друга электронами, позитронами и фотонами высоких энергий через рождение пар и обратное Комптоновское рассеяние на фотонах фонового реликтового, инфракрасного, оптического и ультрафиолетового излучений.

Используются аналитические и численные методы решения соответствующих кинетических уравнений. Автор исследует меру универсальности степенных спектров фотонов, формирующихся в расширяющейся Вселенной. Во второй главе исследованы диффузные потоки фотонов и нейтрино, генерируемые космическими лучами сверхвысоких энергий при их распространении в межгалактической среде. Эти потоки оказываются очень чувствительными к массовому составу и к характеру космологической эволюции источников космических лучей. Проводится сравнение результатов расчетов с данными по внегалактическому гамма-излучению, полученными в космическом эксперименте Fermi LAT, и верхними пределами на потоки космогенных нейтрино в эксперименте IceCube. В третьей главе обсуждается следующая из наблюдений далеких блазаров аномально высокая прозрачность Вселенной для высокоэнергичного гамма-излучения. Автор выдвигает оригинальное объяснение этого явления за счет вторичного фотонного сигнала, возникающего благодаря протонам испущенным теми же источниками. Показано, что этот сценарий может работать, если величина межгалактического магнитного поля очень мала – на уровне не более  $10^{-14}$  Гс. В четвертой главе диссертации рассматривается генерация нейтрино и гамма-излучения вблизи активных ядер галактик – источников космических лучей сверхвысоких энергий, за счет  $pp$  и  $p\gamma$  взаимодействий. Предполагается, что ускорение протонов происходит в окрестности горизонта черной дыры, где фоновое излучение анизотропно распределено в соответствии с моделью аккреции Шакуры-Сюняева. Дальнейшее распространение в межгалактической среде численно рассчитывается по созданной О. Е. Калашевым программе.

Выполненные в диссертационной работе исследования позволили получить целый ряд важных научных результатов: получена универсальная оценка для максимальной концентрации каскадного излучения, основанная

на данных по фоновому гамма-излучению, измеренному в эксперименте Fermi LAT, и верхнему пределу на поток нейтрино с энергией выше 10 ПэВ в эксперименте Ice-Cube; показано, что модели происхождения внегалактических космических лучей с чисто протонным составом, сильной космологической эволюцией и жестким энергетическим спектром источников противоречат данным о фоновом гамма-излучении; также несостоятельной оказывается Top-Down модель происхождения космических лучей с распадом гипотетических частиц сверхтяжелой темной материи; исследована возможность объяснения аномальной прозрачности Вселенной для гамма-излучения с энергией выше 200 ГэВ от далеких блазаров за счет производства каскадного излучения протонами сверхвысоких энергий на сравнительно близких от наблюдателя расстояниях, на которых поглощение мало; показано, как эта гипотеза может быть проверена следующим поколением черенковских гамма-телескопов типа СТА; построена модель распространения высокоэнергичных протонов вблизи ядер активных галактик, сопровождающаяся генерацией фотонов и нейтрино за счет  $pp$  и  $p\gamma$  взаимодействий в поле анизотропно распределенного излучения аккрецирующего диска.

Достоверность основных положений диссертации обеспечивается использованием автором адекватных аналитических и численных математических методов и методов теоретической физики, тщательным анализом используемых данных астрофизических наблюдений и сопоставлением результатов расчетов с экспериментальными данными о космических лучах.

Научная и практическая ценность работы О. Е. Калашева заключается в том, что проведенный автором анализ излучений, производимых космическими лучами сверхвысоких энергий при распространении в межгалактической среде дает информацию о составе космических лучей и свойствах их источников. Это особенно важно ввиду сохраняющейся

неопределенности в интерпретации результатов прямых измерений в экспериментах на установках по изучению широких атмосферных ливней.

В процессе изучения текста диссертации у оппонента не возникло существенных замечаний по ее содержанию. Основное внимание автор уделяет варианту с чисто протонным составом космических лучей вплоть до самых высоких энергий, что соответствует интерпретации результатов, полученных коллаборацией исследователей, работающих на установке Telescope Array (О. Е. Калашев сам является членом этой коллаборации). Было бы полезно кратко суммировать, насколько изменятся основные полученные в диссертации результаты по интерпретации наблюдений гамма-излучения и нейтрино, если верными окажутся данные по энергетическому спектру, среднему массовому числу и его дисперсии, полученные в эксперименте по космическим лучам Auger. В этом случае состав источников космических лучей включает тяжелые ядра вплоть до железа. Энергетический спектр источников очень жесткий, примерно  $E^{-1}$ , с максимальной энергией частиц приблизительно равной  $5 \cdot 10^{18} Z$  эВ. Результаты Auger были названы «разочаровывающими» с точки зрения производства вторичного излучения и нейтрино [Aloisio et al., *Astropart. Phys.* 34, 620 (2011); *JCAP* 1410, 10, 020 (2014)], но являются обнадеживающими с точки зрения возможности ускорения частиц в астрофизических условиях.

Материал диссертации изложен ясно и подробно, хотя и несколько перегружен введенными сокращениями и условными обозначениями. Вместо общеупотребительного термина «внегалактический» введен термин «экстрагалактический».

По мнению оппонента диссертационная работа О. Е. Калашева заслуживает высокой оценки. Диссертация является оригинальной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором теоретических исследований решается важная проблема генерации фотонов

и нейтрино в процессе распространения космических лучей сверхвысоких энергий вблизи источников и в межгалактической среде в целом.

Основные выносимые автором на защиту результаты являются новыми. Они опубликованы в престижных научных журналах и имеют высокий индекс цитирования. Они также были успешно представлены на многих российских и зарубежных научных конференциях и семинарах.

Автореферат верно отражает содержание диссертации.

Диссертация О. Е. Калашева «Космические лучи ультравысоких и сверхвысоких энергий. Сопутствующие нейтринные и фотонные излучения» полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям согласно «Положению о присуждении ученых степеней», утвержденному Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор Олег Евгеньевич Калашев несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Доктор физико-математических наук  
главный научный сотрудник ИЗМИРАН

В. С. Птускин

Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт земного  
магнетизма, ионосферы и распространения  
радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской  
академии наук (ИЗМИРАН)  
108840, г. Москва, г. Троицк,  
Калужское шоссе, д. 4  
ИЗМИРАН  
Тел. 8 (495) 851-0925  
E-mail: vptuskin@izmiran.ru

20 декабря 2016 г.

Подпись В.С. Птускина удостоверяю  
Ученый секретарь ИЗМИРАН  
кандидат физ.-мат. наук

А.И. Рез

# Птускин Владимир Соломонович

доктор физико-математических наук

специальность: 01.04.02 - теоретическая физика

## Основные публикации по теме диссертации за последние 5 лет

1. **“Type II<sub>n</sub> supernovae as sources of high energy astrophysical neutrinos”**  
V. N. Zirakashvili and V. S. Ptuskin.  
arXiv:1510.08387 [astro-ph.HE]  
DOI:10.1016/j.astropartphys.2016.02.004  
Astropart. Phys. **78**, 28 (2016)
2. **“Inverse problem for extragalactic transport of ultra-high energy cosmic rays”**  
V. S. Ptuskin, S. I. Rogovaya and V. N. Zirakashvili.  
arXiv:1409.4654 [astro-ph.HE]  
DOI:10.1088/1475-7516/2015/03/054  
JCAP **1503**, 054 (2015)
3. **“Tunka-133: Results of 3 year operation”**  
V. V. Prosin *et al.*  
DOI:10.1016/j.nima.2013.09.018  
Nucl. Instrum. Meth. A **756**, 94 (2014).
4. **“Spectrum and Anisotropy of Cosmic Rays at TeV-PeV-energies and Contribution of Nearby Sources”**  
L. G. Sveshnikova, O. N. Strelnikova and V. S. Ptuskin.  
arXiv:1301.2028 [astro-ph.HE]  
DOI:10.1016/j.astropartphys.2013.08.007  
Astropart. Phys. **50-52**, 33 (2013)
5. **“Propagation of galactic cosmic rays”**  
V. Ptuskin.  
DOI:10.1016/j.astropartphys.2011.11.004  
Astropart. Phys. **39-40**, 44 (2012).
6. **“Spectra of Cosmic Ray Protons and Helium Produced in Supernova Remnants”**  
V. Ptuskin, V. Zirakashvili and E. S. Seo.  
arXiv:1212.0381 [astro-ph.HE]  
DOI:10.1088/0004-637X/763/1/47  
Astrophys. J. **763**, 47 (2013)
7. **“Numerical simulations of diffusive shock acceleration in SNRs”**  
V. N. Zirakashvili and V. S. Ptuskin.  
arXiv:1109.4482 [astro-ph.HE]  
DOI:10.1016/j.astropartphys.2011.09.003  
Astropart. Phys. **39-40**, 12 (2012)
8. **“Cosmic rays in galactic and extragalactic magnetic fields”**  
F. Aharonian, A. Bykov, E. Parizot, V. Ptuskin and A. Watson.  
arXiv:1105.0131 [astro-ph.HE]  
DOI:10.1007/s11214-011-9770-3  
Space Sci. Rev. **166**, 97 (2012)